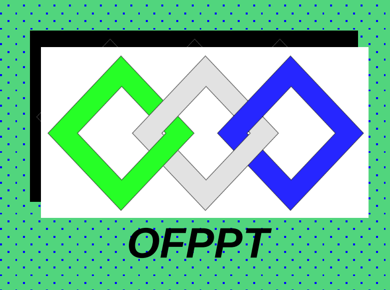


ROYAUME DU MAROC



Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

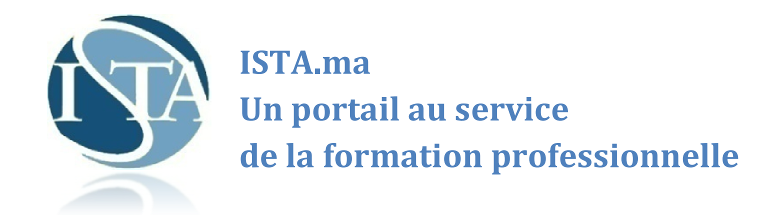
RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

MODULE N°:15 COMBUSTION ET COMBUSTIBLES

SECTEUR : FROID ET GENIE THERMIQUE

SPECIALITE : TMGS- TSGS

NIVEAU : TCHNICIEN SPECIALISE ET TECHNICIEN



Le Portail http://www.ista.ma

Que vous soyez étudiants, stagiaires, professionnels de terrain, formateurs, ou que vous soyez tout simplement intéressé(e) par les questions relatives aux formations professionnelle, aux métiers, **http://www.ista.ma** vous propose un contenu mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, et une variété de ressources documentaires, de supports de formation ,et de documents en ligne (supports de cours, mémoires, exposés, rapports de stage …) .

Le site propose aussi une multitude de conseils et des renseignements très utiles sur tout ce qui concerne la recherche d'un emploi ou d'un stage : offres d'emploi, offres de stage, comment rédiger sa lettre de motivation, comment faire son CV, comment se préparer à l'entretien d'embauche, etc.

Les forums **http://forum.ista.ma** sont mis à votre disposition, pour faire part de vos expériences, réagir à l'actualité, poser des questionnements, susciter des réponses.N'hésitez pas à interagir avec tout ceci et à apporter votre pierre à l'édifice.

Notre Concept

Le portail **http://www.ista.ma** est basé sur un concept de gratuité intégrale du contenu & un modèle collaboratif qui favorise la culture d'échange et le sens du partage entre les membres de la communauté ista.

Notre Mission

Diffusion du savoir & capitalisation des expériences.

Notre Devise

Partageons notre savoir

Notre Ambition

Devenir la plate-forme leader dans le domaine de la Formation Professionnelle.

Notre Défi

Convaincre de plus en plus de personnes pour rejoindre notre communauté et accepter de partager leur savoir avec les autres membres.

Web Project Manager

- Badr FERRASSI : http://www.ferrassi.com

- contactez : admin@ista.ma

REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce module .

Pour la supervision

M. Rachid GHRAIRI *: Directeur du CDC Génie Electrique Froid et Génie Thermique*
M. Mohamed BOUJNANE *: Chef de pôle C D C Froid et Génie Thermique*

Pour l'élaboration

Mr. AKKAOUI HASSAN *ISGTF DRGC*

Pour la validation :

M. OUDGHIRI OMAR ***:*** *Formateur à l'ISGTF*
M. MALLAK ABDELILAH ***:*** *Formateur à l'ISGTF*

les utilisateurs de ce document sont invites communiquer a la DRIFtoutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme

MR. SAÏD SLAOUI

SOMMAIRE

MODULE : 15	***COMBUSTION ET COMBUSTIBLES***

Durée :72 H

80 % : théorique

20 % : pratique

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

COMPORTEMENT ATTENDU

*Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit **maîtriser les techniques d'usage de combustion**, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent*

CONDITIONS D'EVALUATION

- *À partir de consignes données par le formateur.*
- *À l'aide de documentations techniques fournies par le formateur.*
- *À partir de mise en situation*

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- *Maîtrise de l'exploitation des différents combustibles et respect des consignes de sécurité.*
- *Calcul précis du rendement de combustion.*
- *Calcul du pouvoir et d'émission calorifique de la combustion.*

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Connaître les combustibles	• *Connaissance juste de la définition de combustible* • *Explication pertinente du pouvoir calorifique d'un combustible*
B. Assurer la combustion complète	• *Définition exacte d'une combustion complète* • *Calcul précis des pouvoirs comburivore et fumigène* • *Calcul exact de la composition de fumées*
C. Faire le réglage du brûleur	• *Définition exacte et descriptive de l'analyse de CO_2,O_2 et de CO* • *Usage correct des appareils d'analyse* • *Réglage adéquat de l'excès d'air pour assurer la combustion idéale*
D. Calculer le rendement de combustion	• *Mesure exacte de la température des fumées* • *Lecture correcte des pertes par fumées à partir des tables* • *Calcul exact des pertes par les fumées à l'aide des formules* • *Calcul correct du rendement de la combustion*

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE DOIT MAITRISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR-PERCEVOIR OU SAVOIR-ETRE JUGES PREALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

Avant d'apprendre à connaître les combustibles (A), le stagiaire doit :

1. *Décrire la composition de la matière*
2. *Connaître les réactions chimiques*

Avant d'apprendre à assurer la combustibles complète (B), le stagiaire doit :

3. *Décrire les équations fondamentales de la combustion*
4. *Connaître les différents types de combustion*
5. *Décrire la combustion neutre*
6. *Calculer les paramètres de la combustion neutre*

Avant d'apprendre à faire le réglage du brûleur (C), le stagiaire doit :

7. *Connaître les différents organes d'un brûleur*
8. *Connaître le rôle de chaque organe du brûleur*
9. *Maîtriser les différents circuits d'un brûleur*
10. *Savoir entretenir et nettoyer les différents organes du brûleur*

Avant d'apprendre à calculer le rendement de la combustion (D), le stagiaire doit :

11. *Connaître la notion de rendement*
12. *Connaître l'utilisation des tableaux à plusieurs entrées*

PRESENTATION DU MODULE

Le module combustibles et combustion est le 15 module de la formation qualifiée « technicien spécialise en génie climatique » .
Il est ainsi adapté aux besoins de formation continue (perfectionnement, reconversion…)
Ce document s'adresse au formateur.
Il a pour but de l'aider dans son enseignement et de faciliter l'atteinte des objectifs de formation.
Ainsi, le formateur sera en mesure de développer telle ou telle partie de ce module, selon ses expériences personnelles.

Ce module comprend les étapes suivantes :

- *Connaître les combustibles*
- *Assurer la combustion complète*
- *Faire le réglage du brûleur*
- *Calculer le rendement de combustion*

La durée globale de ce module est 72 Heures reparties en :

- *80 % : théorique*
- *20 % : pratique*

Module N°15 : Combustibles et Combustion

RESUME THEORIQUE



NOTIONS SUR LA COMBUSTION ET LES COMBUSTIBLES

Ce chapitre rappelle des notions importantes sur la combustion. On donne d'abord les définitions et les valeurs des principales caractéristiques des combustibles industriels. On traite également les différents modes de combustion et la notion importante de l'excès d'air optimal. Enfin l'importance de la composition des fumées pour le contrôle de la combustions et les principaux appareils utilisés sont présentés.

1. COMBUSTIBLES

1.1 Définition :

Un combustible est une substance(solide, liquide ou gazeuse) qui peut se combiner facilement avec l'oxygène selon une réaction chimique. Cette combinaison, dite combustion, se manifeste généralement par les flammes ou l'incandescence des corps qui brûlent et s'accompagne d'un important dégagement de chaleur. Dans la pratique l'oxygène utilisée dans la combustion provient de l'air.

Les principaux Combustibles Industriels sont donnés dans la table 1.1

Table 1.1 – principaux combustibles industriels

Les combustibles solides : les différents types de charbon.
Les combustibles liquides : les dérivés liquides du pétrole tels que les fiouls et le gasoil.
Les combustibles gazeux : le gaz naturel et les dérivés gazeux du pétrole tels que la propane et le butane

1.2 Compositions des combustibles :

La composition chimique est une caractéristique importante des combustibles. Les combustibles utilisée dans l'industrie sont composés contenant essentiellement les corps suivants :

- *Les matières combustibles (symbole chimique C), l'hydrogène (symbole chimique H) – d'où le nom d'hydrocarbure- et en quantité moindre, le souffre (symbole chimique S)*
- *Les matières incombustibles : l'eau (symbole chimique H_2O), l'azote (symbole chimique N) et le cendres (surtout pour les combustibles solides).*

1. Les compositions chimiques du Fioul N°2 et du ch arbon importé sont présentées dans la table 1.2.

Table 1.2 -	**Exemple de compositions massiques moyennes de combustible**	
	Fioul N°2	*Charbon importé (matières sèches)*
Carbone	*85.9 %*	*87.0 %*
Hydrogène	*10.5 %*	*5.2 %*
Soufre	*3.0 %*	*0.5 %*
Oxygène	*0.4 %*	*5.8 %*
Azote	*0.2 %*	*1.5 %*

1.3 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la qualité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse (ou de volume pour les gaz) de ce combustible.

Le pouvoir calorifique est grandeur importante dont dépend la valeur technique et commerciale des combustibles, il est en effet possible de calculer le pouvoir calorifique d'un combustible à partir de sa composition.

On distingue l deux pouvoir calorifique : supérieur (PCS) et inférieur (PCI). Le pouvoir calorifique supérieur est égal au PCI plus la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau formée par la combustion. Cette chaleur latente est égale à 2510 KJ (600 Kcal) par Kg d'eau.

Table1.3 -	**Valeurs du PCI pour les combustibles les plus utilisés au Maroc**
Combustible	**PCI (kcal / kg**
Charbon local	**5600**
Charbon emporté	**6400**
GPL (butane, propane)	**11000**
Gasoil	**10200**
Fioul lourd N°2	**9600**
Fioul lourd N°7	**9800**
Bois	**4400**
Bagasse	**3000**
Grignons d'olives	**4300**

1.4 Propriétés physiques des combustibles liquides :

Les combustibles liquides sont obtenus par distillation des produits pétroliers bruts. Les combustibles liquides se divisent en deux classes.

- *Les combustibles distillés à molécules relativement légères tels que le pétrole lampant et le fioul domestique appelé gasoil.*

- *Les combustibles résiduels ou se concentrent les molécules les plus lourdes contenue dans le pétrole brut tels que les fiouls N°1.2et 7.*

Les différents fiouls se distinguent par leurs propriétés physiques, en particulier :

- *Le point d'éclair : c'est la température minimale à laquelle le fioul commence à émettre des vapeurs qui s'enflamme en présence d'une flamme.*

Elle est 55℃ pour les fiouls domestiques et supéri eur à 70℃ pour les fiouls lourds. C'est une caractéristique de sécurité.

- *Le point d'écoulement : c'est la température à laquelle se fige le liquide. Pour les fiouls lourds, cette température peut atteindre 40℃.*

La viscosité : elle caractérise la fluidité des produits. Pour se rapprocher des conditions de mise en œuvre, la viscosité est déterminée à 20℃ pour les fiouls domestiques (inférieure à 9 centistockes) et à 100℃ pour les fiouls lourds (inférieure à 40 cst)
La viscosité est un paramètre qui intervient lors des transfert du combustible(préchauffage des fiouls) et de la combustion (pulvérisation des fiouls). Plus un fioul est visqueux, c'est le cas des fiouls lourds plus il nécessite un réchauffage plus important en vue d'une utilisation correcte et aisée.

La chimie est la science qui étudie la nature et la propriété des corps. L'action de ces corps les uns sur les autres et les combinaisons qui en résultent.

1.5 Propriétés chimiques des combustibles :

a) La matière :

La matière est « discontinue »
Toute matière minérale, végétale, animale sous quelque forme qu'elle soit, est constitué par un assemblage de parcelles infinitésimales et insécables.
On distingue :

- *Les corps simples ;*
- *Les corps composés.*

b) Corps simples :

Les corps simples sont des corps qui ne peuvent subir aucune décomposition et leur ultime division est l'atome.
Tous les atomes d'un même corps simple sont identiques et on les même propriétés.
Dans la nature, on a dénombré à ce jour une centaine de corps simples(103) dont 92 éléments naturels. Leur nombre est donc limité et une trentaine d'entre eux seulement sont courante.
Nous citerons : l'oxygène, l'azote, le carbone, le souffre, l'hydrogène, le silicium, le calcium, le potassium, le fer, le cuivre le plomb, l'or, l'argent, le chlore, le phosphore, le néon…

c) Corps composés :

Ils résultent de la combinaison de corps simples dans des proportions définies, toujours les même pour donner naissance à de nouveaux corps qui ont leurs propriétés spécifiques n'ayant plus rien de commun avec les constituants.

Exemple :

1. *Combinaison du carbone et l'oxygène donne soit du gaz carbonique, soit de l'oxyde de carbone selon les proportions des constituants.*

2. *Combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène donne naissance à l'eau.*

3. *Combinaison du chlore et de l'hydrogène donne l'acide chlorhydrique.*

4. *Combinaison du souffre et de l'oxygène donne le gaz sulfureux.*

Les assemblages d'atome sont quasiment infinis et les corps composés existent par milliers.

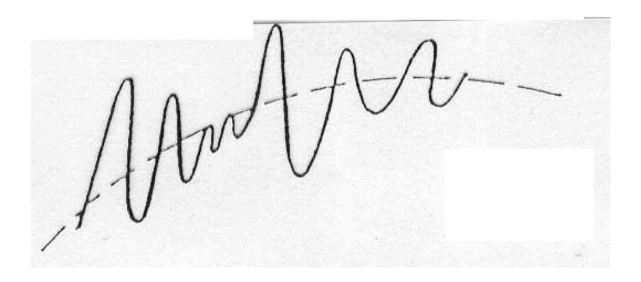


Fig. 3

Cette agitation est fonction de certaines énergies externes et entre autre. de la température. Plus la température s'élève, plus cette agitation est intense. par contre , si la température s'abaisse. Cette agitation diminue pour s'arrêter complètement à –273° C ; c'est la température dite du repos de la m atière, qu'on appelle couramment « zéro absolu »

d. La molécule :

L'atome a été jusqu'a la fin du siècle dernier comme indestructible. Ceci s'est avéré faux car il est possible de transformé un atome en un atome différent, mais ceci et du domaine de la physique nucléaire qui s'occupe particulièrement du noyau.

En chimie classique, celle qui nous intéresse dans nos problèmes de réaction de combustion par exemple, les atomes sont indestructibles et peuvent s'unir entre eux pour donner des ensembles ayant leurs propriétés. A noter que les atomes peuvent néanmoins passer à l'état d'ion et cette formation d'espèce nouvelle pourra dans certains cas donner naissance à un corps composé.

Ces associations d'atomes donneront naissance aux molécules et la molécule sera la plus petite quantité de matière qui puisse exister à l'état libre, que l'on pourra isoler et qui conservera ses propriétés et caractéristiques.

Nous considérons donc schématiquement :

- Les associations d'atomes de même nature qui donnent naissance aux molécules de corps simples.

2. COMBUSTION

Les éléments nécessaires à la combustion sont : le combustible et l'oxygène
Au cours de la combustion les composants chimiques du combustible (C, H_2, O_2 et S) réagissent avec l'oxygène selon les réactions suivantes :

Réactions principales :

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 394 \text{ KJ /mole}$$
$$H_2 + ½ O_2 \rightarrow H_2O + 242 \text{ Kj/mole}$$

$$C + ½ O_2 \rightarrow CO + 111 \text{ KJ /mole}$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + 71 \text{ Kj / mole}$$

Les chaleurs dégagées représentent les chaleurs des réactions de combustions.

2.1 Air comburant :

On a déjà mentionné que dans la pratique industrielle, l'oxygène nécessaire à la combustion est apportée par l'air. Cet air est appelé « air comburant »

On sait que la composition volumique de l'air est approximativement :
21% d'oxygène
79%d'azote

L'azote n'intervient pas dans la combustion et se retrouve donc intact dans les fumées. Il se peut qu 'on retrouve également de l'oxygène s'il est en excès.

2.2 Produits de la combustion :

Les produits de la combustion sont les fumées (gaz) et les cendres (pour les combustibles solides) ; leur composition dépend du combustible et de la quantité d'air utilisée.

Les fumées sont formées par les oxydes des corps composant le combustible (essentiellement CO_2, H_2O, CO), l'azote (N_2) et éventuellement les imbrûlés et l'oxygène (O_2) en excès.

Les cendres sont formées par les imbrûlés solides et les matières minérales non combustibles.

La composition des fumées exprimée en pourcentage des différents composants renseigne sur la combustion. On verra dans le paragraphe suivant, qu'un pourcentage élevé de CO, par exemple indique que la combustion n'est pas complète.

2.3 Mode de combustion :

Comme dans toute réaction chimique, la combustion d'une unité de masse du combustible nécessaire une quantité bien définie d'oxygène qui est appeler : stœchiométriques.

Cette quantité théorique dépend bien sûr de la composition du combustible. On distingue trois modes de combustion selon la quantité d'air utilisée.

2.3.1 Combustion neutre :

La combustion est neutre lorsque l'air utilisé est en quantité égale à la valeur stœchiométrique. L'oxygène apporté doit théoriquement suffire exactement à assurer une combustion complète (transformation de tout le C en CO2. Ceci est difficile à réaliser dans la pratique.

Pour une combustion neutre, l'équation de la réaction permet de calculer la composition des fumées.
La table 1.4 donne la teneur CO2 des fumées de la combustion neutre pour les combustibles usuels.

Dans la pratique à cause des contraintes physique d'atomisation, la réalisation d'une combustion complète nécessite un excès d'air, la teneur en CO2 doit donc être inférieure à la valeur donnée dans la table 1.4.

Table 1.4 – la teneur théorique en CO_2 pour ***les combustibles usuels cas de la combustion neutre.***

Charbon	*19%*
Fioul	*16%*
GPL(butane, propane)	*14%*

2.3.2 Combustion réductrice :

Lorsque la quantité d'air utilisée est inférieure à la valeur stœchiométrique, la combustion est dite réductrice. Dans ce cas, la combustion est incomplète car il y a un manque d'air ou une mauvaise atomisation. Selon les chaleurs de réaction donnée au paragraphe précèdent, la combustion incomplète entraîne une perte de chaleur de 283 KJ par mole de CO non brûlé. Comme nous allons le voir par la suite, l'optimisation de la combustion complète, permettant ainsi de tirer profit de toute la chaleur potentielle du combustible. On reconnaît une mauvaise combustion.

- à la couleur noire des fumées et la formation de suie due au carbone provenant de la décomposition d'une partie du combustible,
- à la faible teneur de CO_2 dans les fumées,
- au pourcentage élevé de CO dans les fumées.

2.3.3 Combustion oxydante – excès d'air :

On constate que malgré tout le soin apporté à la conception des brûleurs, on est obligé d 'utiliser une quantité d'air supérieure à la valeur stœchiométrique pour assurer une combustion. On a alors une combustion dite oxydante.

La différence entre la quantité d'air utilisée et la valeur stœchiométrique, exprimée en pourcentage de celle-ci est appelée « EXCES D'AIR »

La formule de définition de l'excès d'air est donc :

$$\text{Excès d'air (e)} = \frac{\text{Volume d'air utilisé} - \text{Volume d'air théorique}}{\text{Volume d'air théorique}} \times 100$$

<u>Exemple</u> :

Soit une combustion qui nécessite un volume d'air théorique de 1 m3. lorsque, pour la même combustion, on utilise un volume d'air de 1.5 m3, l'excès d'air est :

$$\text{Excès d'air (e)} = \frac{1.5 - 1.0}{1.0} \times 100 = 50\%$$

dans la pratique, on calcule le pourcentage de l'excès d'air de la teneur en CO2 ou en O2 des fumées. Les analyseurs utilisés pour mesurer ces teneurs sont présentés dans le paragraphe 3.2.

les deux formules suivantes – qui sont équivalentes- donnent de bonnes approximations de l'excès d'air en fonction de la teneur en CO_2 ou en O_2 dans les fumées :

$$e\ (\%) = \frac{O_2}{21 - O_2} \times 100$$

$$e\ (\%) = \frac{CO_2\ \text{théorique} - CO_2\ \text{réel}}{CO_2\ \text{réel}} \times 100$$

D'où : O_2 est la teneur en oxygène mesurée en %, CO_2 réel est le teneur en CO_2 mesurée et CO_2 théorique en CO_2. quelques valeurs de la teneur théorique en CO_2, qui ne dépend que du type de combustible, sont données dans la table 1.4. Noter que l'excès d'air peut être également lu directement dans les tables 2.2 à 2.5 du chapitre 2.

Les formules précédentes montrent que :

- *Lorsque la teneur en O_2 augmente c'est que l'excès d'air a aussi augmenté.*
- *Lorsque la teneur en CO_2 augmente, c'est que l'excès d'air a diminué.*

Bien que l'utilisation d'une quantité importante d'air permette d'avoir une combustion complète, l'air en excès se retrouve dans les fumées. L'augmentation de volume important des fumées entraînent une augmentation des pertes et donc une baisse du rendement. De même lorsque la quantité d'air utilisé est inférieure à la valeur stœchiométrique, la combustion n'est pas complète (réductrice), ce qui est traduit par un taux élevé de CO dans les fumées. La présence d'imbrûlés dans les fumées entraîne dans ce cas également une baisse du rendement. Donc, entre ces deux extrêmes, le rendement de combustion (et de la chaudière) passe par un maximum comme le montre la figure 1.1. cette figure montre également les variations qualitatives des teneurs des différents composants des fumées en fonction de l'excès d'air ; la teneur en oxygène (O_2) augmente et celle du monoxyde de carbone CO commence par augmenter, passe par une valeur maximale avant de diminuer lorsque l'excès d'air augmente.

Exemple d'application

Calculer l'excès d'air sachant que les teneurs mesurées de 13% pour le CO2 et de 4% pour l'O2 le combustible utilisé est le fioul lourd N°2

A partir de la teneur en O2 on a :

$$\text{Excès d'air} = \frac{4}{21 - 4} \times 100 = 23\%$$

pour le fioul lourd N°2, la table 1.4 donne une CO2 théorique de 16% d'où :

$$\text{Excès d'air} = \frac{16 - 13}{13} \times 100 = 23\%$$

les deux formules donnent logiquement le même résultat.

Le réglage de l'excès d'air présenté dans la suite, a pour objet de trouver la quantité d'air optimale pour laquelle la somme des pertes par imbrûlés et de pertes par la chaleur sensible des fumées, dues à l'excès d'air, est minimale.

- *Le type de brûleur*
- *Le type de combustible*
- *Le taux de charge de la chaudière.*

L'excès d'air utilisé est déterminé par la mesure de la composition des fumées. Les relations précédentes donnent l'excès d'air en fonction de la teneur en CO_2 ou de O_2.

2.4 Conditions nécessaires à la combustion :

La combustion n'est pas spontanée : il ne suffit pas de mettre en contact un combustible industriel avec l'oxygène pour le déclencher. Il faut, en plus, créer des conditions favorables à l'initiation, au développement et au maintien de cette combustion.

Nous présentons succinctement dans cette section les trois conditions essentielles au processus de combustion.

- *La température du combustible doit être portée et maintenue à une température suffisamment élevée, supérieure à la température d'inflammation, pour compléter toutes les réactions de combustion.*
- *Un bon mélange entre l'air et le combustible doit être assurer. La composition du mélange doit être adéquate pour assurer des conditions favorables de combustion.*
- *Le temps de séjour du mélange, dans la zone de combustion doit être suffisamment long pour assurer la combustion complète du combustible.*

Si l'une des trois conditions n'est pas remplie, la combustion ne commence pas, s'arrête ou se fait mal.

2.4.1 Température d'inflammation :

La température d'inflammation est la température minimale en dessous de laquelle le combustible ne peut brûler.

Pour initier et maintenir la combustion, il faut donc préadolescent porter le combustible au-dessous de cette température et maintenir cette condition. Dans l'enceinte ou se produit la combustion.

La table 1.5 donne les températures d'inflammation de quelques combustibles

.

Table 1.5 – Température d'inflammation Quelques éléments de combustible.

Hydrogène	*500℃*
Oxyde de carbone	*300℃*
méthane	*650℃*
Hydrocarbure lourd	*600 à 800℃*
Carbone	*700℃*
Coke	*700℃*
tourbe	*225℃*

2.4.2 Mélange air-combustible :

Il arrive que même avec un excès d'air, une combustion puisse être incomplète lorsque l'air et le combustible ne sont pas convenablement mélangés. Il est nécessaire d'avoir un mélange air-combustible aussi « intime » que possible pour assurer une combustion complète.
Ainsi pour les combustibles liquide, ce mélange « intime » avec l'air est assuré par une atomisation du combustible en fine gouttelette.

La composition du mélange air-combustible est un paramètre important de la combustion.
Nous l'avons déjà mentionné dans la section 2.3.3. il est en effet nécessaire d'avoir des proportions convenables d'air et de combustible pour assurer une combustion complète.

2.4.3 Temps de séjour :
Après atomisation, les fines gouttelettes du combustible doivent passer suffisamment de temps dans la zone de combustion pour rentrer en contact et réagir avec l'oxygène de l'air.Ainsi un débit d'air trop fort par exemple, limitera le temps de séjour de ces gouttelettes qui seront entraînées dans les fumées avant d'avoir eu le temps de brûler.

3. APPAREILS DE CONTROLE DE LA COMBUTION
3.1 Importance de la composition des fumées :

Il est possible de juger approximativement la qualité de la combustion par une simple observation de la couleur des flammes et des fumées. Cependant une telle appréciation qualitative n'est pas suffisante pour un contrôle rigoureux de la performance de la chaudière.

Pour déterminer la performance de la chaudière, il est nécessaire d'analyser les fumées. On sait déjà que l'excès d'air s'exprime en fonction de la teneur en CO_2 ou en O_2, on verra plus tard que le calcul des pertes par les fumées et du rendement de la chaudière est aussi basé sur la composition des fumées.

3.2 Analyseurs de fumées :

Plusieurs types d'appareils de plus en plus précis permettent l'analyse des fumées, c'est à dire la mesure des teneurs des différents constituants.

Parmi les analyseurs manuels classiques, citons l'appareil d'Orsat et l'appareil Fyrite (voir figure 1.2 et 1.3). Tous les deux sont basés sur un dosage chimique de gaz de combustion.
Ils permettent de mesurer la teneur en CO2 et en O2.

Il existe des appareils automatiques qui ont l'avantage de permettre des analyses en continue, ce qui permet un suivi de fonctionnement de la chaudière. Certains de ces appareils calculent également la valeur du rendement de la combustion (voir figure 1.4.)

3.3 Description :

LE BRIGOTRONIQUE 5000 G est un analyseur de combustion portable, autonome, très compact, outil idéal pour la mise en route, l'entretien ou le dépannage de la chaudière de petites et moyennes puissance. Il offre, en continu, sur son afficheur alphanumérique retro éclairé toutes les mesures et toutes les informations indispensables au bon réglage d'un brûleur, aussi bien pour l'amélioration de son rendement que pour la limitation de ses émissions de polluants. Le contrôle de l'excès d'air ou du ratio air/combustible est particulièrement aisée grâce à la mesure directe du taux d'oxygène (0_2) et de calcul automatique du CO_2.

Paramètre	**Plage**
O2	0 -21 Vol %
C2	0 – 4000 ppm
NO(option)	0 – 1000 ppm
CO2	Suivant combustible
Temp. Ambiante	-20 + 100℃
Temp. fumées	-50 + 500℃
Temp. Nette	0-999℃
Tirage	+/- 100 mbar
Excès d'air	1.00 -+
Rendement	1.0 – 99.9 %

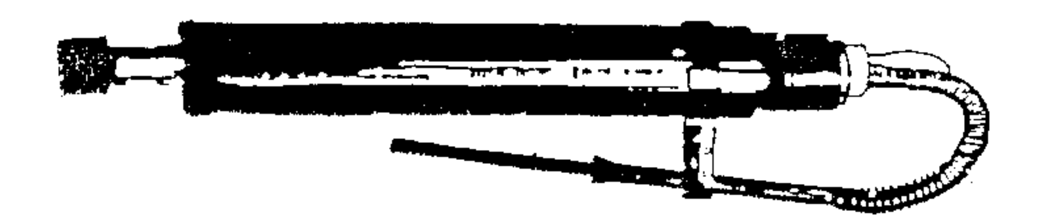
LE BRIGOTORNIQUE 5000 G comprend :

- *Le 5000 G*
- *L'étui de protection*
  - *Un filtre de rechange.*
- *Le chargeur 220 V.50 HZ*
- *Un mode d'emploi*
- *Une mallette de transport*

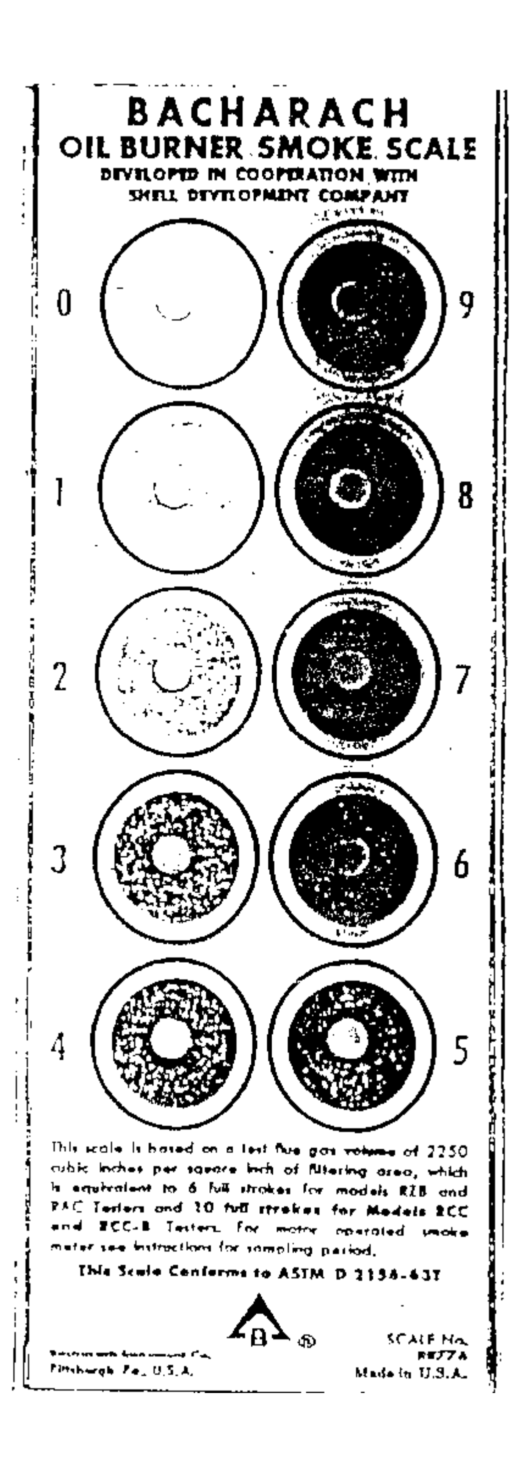
Vous pouvez également vous équiper avec :

- *L'option NO*
- *L'imprimante infrarouge*

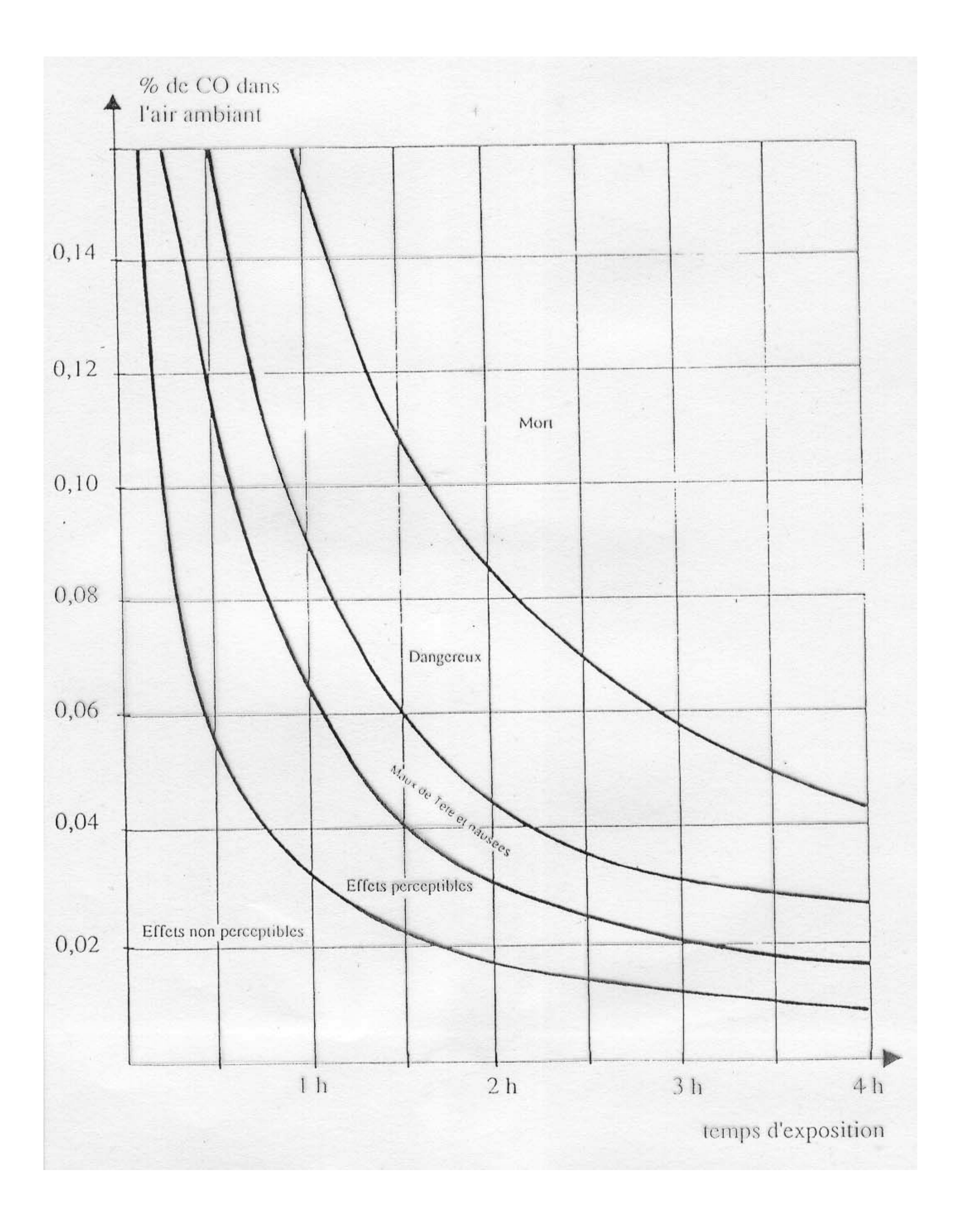
Figure 1.5 –pompe de mesure d'imbrûlés solides et échelle de noircissement



COTE D'OPACITE	RENDEMENT DU BRULEUR
1. EXCELLANT :	**Très peu de suie ou pas du tout dans le foyer*
2. BON :	**Possibilité de légers dépôts de suie dans certains foyers mais très peut d'augmentation, de la température des fumées.*
3. PASSABLE	**Certains foyers seront régulièrement recouverts d'une couche de suite pas au point d'imposer plus d'un nettoyage par an.*
4. MEDIOCRE	**Cas limite certaine foyers se couvriront rapidement de suie ; d'autres modérément.*
5. MAUVAIS	**Encrassement rapide du foyer dans tous les cas rendant nécessaires plusieurs nettoyages au cours de la saison de chauffage.*
6.TRES MAUVAIS	**Couche épaisses de suie sur les surfaces des foyers après peu de temps pouvant avarier le fonctionnement du réglage de la cheminée et diminuer le tirage à un point dangereux.*
BACHARACH INSTRUMENT CO	



EFFETS DU CO SUR L'HOMME



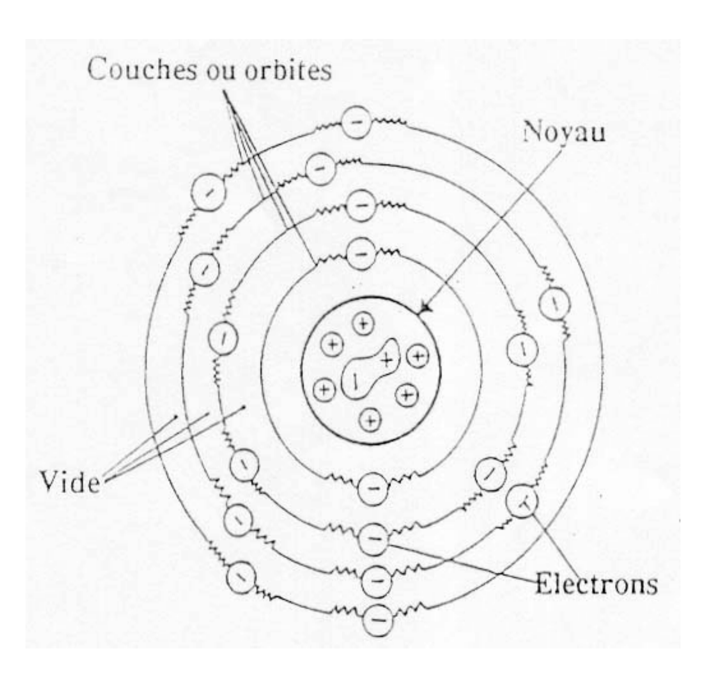
CONSTITUTION DE L'ATOME

Les atomes étant l'ultime division de la matière, ils sont alors les plus petites particules qui conserveront leur individualité au cours des divers combinaisons chimiques que l'on pourra réaliser.

<u>Structure :</u>

Les atomes ont une taille extrêmement petite et l'on pourra retenir les moyennes de l'ordre de :

- *Diamètre Ø = 10^{-7} mm*
- *Masse 10 = 10^{-23} g*



L'atome comprend deux régions distinctes (fig. 1) :

- *Une région centrale appelée noyau formé de deux sortes de particules :*

Les protons + porteurs d'une charge positive (+ e)

Les neutrons + - de charge nulle donc électroniquement neutre

- *Une région dans laquelle gravite dans l'espace sur des orbites bien définies et à des distances relativement grandes du noyau, des électrons de charge négative (- e. on parle souvent du « nuage électronique »*

Nota : *nous précisions que la charge ($\pm$e) = $\pm 1.6 \times 10^{-19}$ coulombs.*

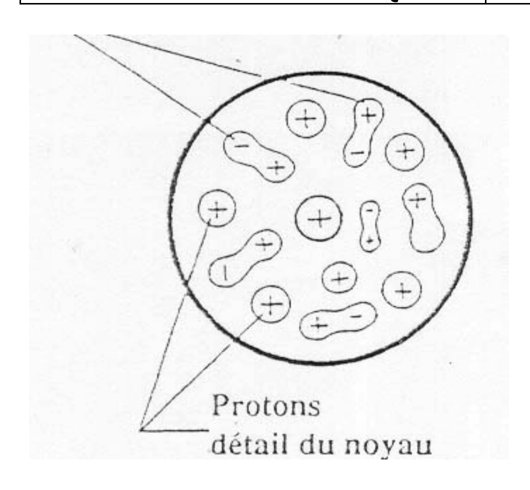


Fig. 2

Masse de l'atome :

Toute la masse de l'atome est pratiquement concentré dans le noyau (fig. 2) et l'on notera que la masse du proton est à peu prés égale à celle du neutron.

L'électron :

Il est ponctuel et à mesure négligeable, 1830 fois plus faible que la masse du proton ou neutron.
Si l'on note également que le diamètre du noyau est d'environ 10 000 à 100 000 fois plus petites que celui de l'atome, le noyau sera très dense par rapport à l'atome.

Stabilité du noyau **:**

Nous savons que toutes les masses sont sollicitées par des forces d'attraction (forces Newtoniennes = n m), les protons et neutrons y sont donc soumit. Nous savons que les charges électrostatiques de même signe (+) ou (-) se repoussent. Dans le cas du noyau, les forces de répulsion sont supérieures aux forces d'attraction.

Pour qu'il y ait stabilité, il faut que le nombre de neutrons soit au moins égal au nombre de protons, et plus le noyau contiendra de protons, plus le nombre de neutrons devra croître au-delà de cette égalité.

Equilibre de l'atome :

Tous les atomes sont électriquement neutres ; il y a donc à l'état d'équilibre autant de protons que d'électrons. Les neutrons n'interviennent pas, leur charge étant nulle.

Nous avons dit précédemment que ces électrons tournaient dans l'espace autour du noyau sur les orbites consentique ; Mais si les trajectoires sont en perpétuelle agitation sur leur orbite et décrivent une sinusoïde de plus ou moins grande amplitude (fig. 3.)

LA MOLECULE

L'atome a été considéré jusqu'à la fin du siècle dernier comme indestructible. Ceci s'est avéré faux car il est possible de transformer un atome en un atome différent, mais ceci est de la physique nucléaire qui s'occupe particulièrement du noyau.

En chimie classique, celle qui nous intéresse dans nos problèmes de réaction de combustion par exemple, les atomes sont indestructibles et peuvent s'unir entre eux pour donner les ensembles ayant leurs propriétés. A noter que les atomes peuvent néanmoins passer à l'état d'ion et cette formation d'espèce nouvelle pourra dans certains cas donner naissance à un corps composé.

Ces associations d'atomes donneront naissance aux molécules et la molécule sera la plus petite quantité de matière qui puisse exister à l'état libre, que l'on pourra isoler et qui conservera ses propriétés et caractéristiques.

Nous considérons donc schématiquement :
- Les associations d'atomes de même nature qui donnent naissance aux molécules de corps simples.

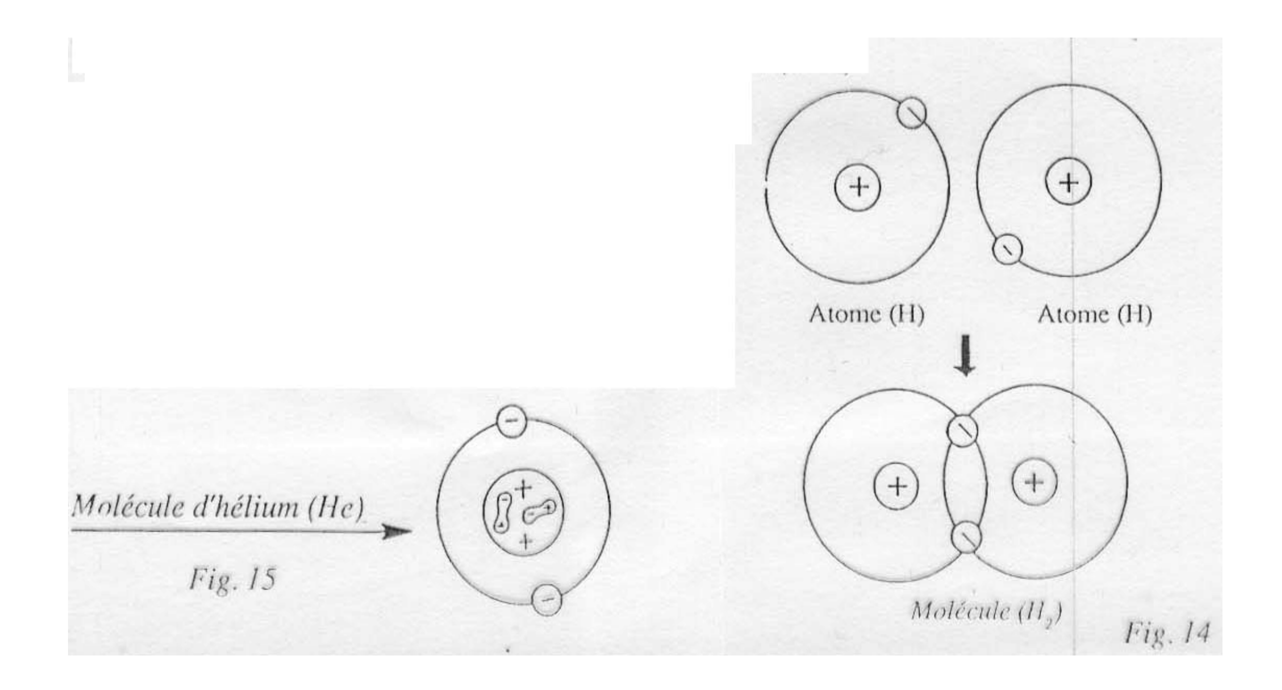


Fig. 15

Fig. 14

COMBUSTION

COMBUSTION DES LIQUIDES :

Coefficient de dilatation cubique
Les liquides se dilatent sous l'action de la chaleur pour les fiouls l'augmentation des volumes est d'environ 0,8 pour mille et par 0C de variation de température, Coefficient de dilation cubique k= 0,8 10^{-3}/ ℃.
Ex : En chauffant 1000 litres de fioul de 10℃ à 30℃ soit 20℃ d'élévation de température, l'augmentation de ce volume à 30℃ ser a donc de 1016 litres.
Remarque importante : - la masse n'a pas changé
- La qualité d'énergie non plus
C'est pour cette raison que certaines organisations de consommateurs souhaitent la livraison par pesée.

DEFINITION GENERALE DES COMBUSTIBLES :

Ce sont des corps simples ou composés qui ont la propriété de réagir avec l'oxygène de l'air en donnant de la chaleur.
En langage chimique c'est une réaction exothermique et oxydation. Les produits de la réaction appelés « oxydes ».

EQUATIONS FONDAMENTALES DE LA COMBUSTION :

Cette étude permettra de déterminer pour une molécule gramme de c,h2,de s2 :
La qualité d'oxygène nécessaire théoriquement pour la brûler.
La quantité d'air qui correspond à cette quantité d'oxygène sachant que l'air est un mélange d'environ :
1 molécule d'oxygène + 4(3,76) molécules d'azote :
O_2+4N_2*(on dit 1/5 de* O_2*,4/5 de* N_2*)*
21% d'oxygène soit O_2+3,76 N_2
79% d'azote (3, 76=79/21)

Dans l'air, seul l'oxygène est l'élément actif qui réagit ; l'azote est un gaz inerte qui ne participe pas aux réactions. Il joue le rôle de « ralentisseur »
L'air est appelé le comburant.

- *La nature et la quantité en poids ou en volume des produits de la combustion que l'on appelle aussi les fumées.*
- *La chaleur dégagée par la combustion complète de la molécule gramme de chacun des constituants* C,H_2,S_2.

ETUDE DES REACTIONS DE COMBUSTIONS NEUTRES

Ce sont les combustions réalisées en fournissant juste l'oxygène (donc l'air) nécessaire pour assurer la combustion complète du combustible (stœchiométrie)

ETUDE DE LA COMBUSTION DU CARBONE REACTON CHIMIQUE FONDAMENTALE

C	+ O_2	= CO_2 + 94 Kcal	= 393 kj
12g	32g	44g	
	↓	↓	
	22.4 L	22.4 L	

La combustion se fait en prenant l'oxygène dans l'air, nous aurons donc une quantité d'azote qui va accompagner les 22.4 litres d'oxygène.
Ce volume d'azote (N_2) sera égal :

$$N_2 = \frac{22.4 \times 79}{21} = 22.4 \times 3.76 = 84.22 \text{ litres.}$$

Ce volume d'air sera lui égala :

Volume de O_2 + volume de N_2 = 22.4 + 84.22 = 106.62 litres
On peut écrire directement :

$$\text{Volume d'air} = \frac{22.4 \times 100}{21} = 22.4 \times 4.76 = 106.62 \text{ litres}$$

A partir la relative fondamentale qui met en jeu 12 gramme de carbone nous pouvons calculer pour 1kg (1000g) de carbone :

- *Le volume d'oxygène nécessaire pour brûler 1kg de C*
- *Le volume d'azote qui accompagne cet oxygène.*
- *Le volume d'air dit de compagne cet oxygène.*
- *Le volume de gaz carbonique produit.*
- *Le volume des fumées qui sera égal au volume de CO_2 + volume de N_2*
- *La quantité de chaleur dégagée par la combustion de 1kg de C.*

Volume d'oxygène (V.0_2)

On sait que pour brûler 12 g de C il faut 22.4 l de O_2 ; pour brûler 1 gramme de C il faut 12 fois

$$\text{Moins d'oxygène } \frac{22.4 \text{ L}}{12 \text{ g}}$$

et pour brûler 1kg (1000g) il en faudra 1000 fois plus on a : $V.O_2 = \frac{22.4 \times 1000}{12} = 1866\ L \approx 1.860\ m^3\ (n)$

Volume d'azote :

$$V.N_2 = \frac{1866 \times 79}{21} = 7.020\ L = 7.020\ m^3\ (n)$$

ou

$V.\ N_2 = 1866 \times 3.76 = 7020$ *litres* $= 7.020\ m^3\ (n)$

Volume d'air de combustion (V. air) :

on peut soit :

- faire la somme $V.\ O_2 + V.\ N_2$ *d'air.*

$V.\ air = 1866 + 7020 = 8886$ *litres* $= 8.886 m^3\ (n)$

- *En tenant compte du rapport de l'oxygène dans l'air qui on sait est 21/100*
-

$$V.\ air = \frac{V\ O_2 \times 100}{21} \Rightarrow \frac{1866 \times 100}{21} = 8886\ \text{litres} = 8.886\ m^3$$

ce ci revient à dire que chaque fois qu'il y a 21 litres d'oxygène, on a 100 litres d'air. Donc pour 1 litre d' oxygène on a $\frac{100}{21}$ *litres d'air pour 1/866 litres d'oxygène.*

Volume de CO_2 ***produit*** ($V.CO_2$) ***:***

La combustion de 12g de C produira 22.4 litres de CO_2 *donc la combustion de 1g de C produira* $\frac{22.4}{12}$ *litres de* CO_2 *et la combustion de 1kg (1000 g), 1000 fois plus.*

On a donc : $V.\ CO_2 = \frac{22.4 \times 1000}{12} = 1866$ *litres* $= 1.866 m^3\ (n)$

Volume des fumées (V.F) :

Les fumées sont dans ce cas constituées uniquement par le CO_2 *et l'azote de l'air de combustion, le volume de fumée sera donc :*

V. F = V CO_2 + VN_2
V. F = 1866 + 7020 = 886 litres = 8.886 m^3 (n)

En combustion neutre le volume des fumées produit par la carbone est égal au volume de l'air de combustion quantité de chaleur dégagée par 1kg des carbone.

La 1ère réaction nous dit que 12g de C produisent 94 kcal donc 1 g de C produit $\frac{94}{12}$

et 1 kg de C (1000g) dégageront.

$\frac{94 \times 1000}{12}$ *=7833 kcal/kg de C.*

ETUDE DE LA COMBUSTION DU SOUFRE :

Réaction chimique fondamentale :

S2 + $2O_2$ = $25O_2$ + 138.8 kcal

2 x 32 g = 64g — 2 x 32 g = 64g → 2 x 22.4L = 44.8L — 2 x 64 g = 128g → 2 x 22.4L = 44.8L

Le soufre étant diatomique ou deverait retenir cette présentation, mais dans la plus part des ouvrages vous trouverez la formule simplifiée :

S2 + O_2 = SO_2 + 69.8 kcal

32 g — 32 g → 22.4L — 64 g → 22.4L

Nous retordrons donc cette dernière égalité pour les calarls, et comme pour le carbone, nous allons déterminer les divers postes qui nous intéressent lors qu'on brûle 1kg de soufre.

Volume d'oxygène ($V.O_2$) :

D'après la dernière réaction on a :

$$V.O_2 = \frac{22.4 \times 1000}{32} = 700 \text{ litres} = 0.700 \text{ m}^3 \text{ (n)}$$

Volume d'azote ($V.N_2$) :

$$V.N_2 = \frac{700 \times 79}{21}$$

$$V.N_2 = 700 \times 3.76 = 2633 \text{ litres} = 2.633 \text{ m}^3 \text{ (n)}$$

Volume d'air de combustion :

$$V.\ air = V.\ O_2 + V.\ N_2$$

$$V.\ air = 700 + 2633 = 3333 \text{ litres} = 3.333 \text{ m}^3 \text{ (n)}$$

On aurait pu écrire :

$$V.\ air = \frac{700 \times 100}{21} = 700 \times 4.76 = 3333 \text{ litres} = 3.333 \text{ m}^3 \text{ (n)}$$

Volume d'anhydride sulfureux (V. SO_2) :

$$V.\ SO_2 = \frac{22.4 \times 1000}{32} = 700 \text{ litres} = 0.700\ m^3\ (n)$$

En effet la réaction précise en cours que le volume d'oxygène nécessaire à la combustion neutre est égal au volume de SO_2 produit. Donc en combustion neutre nous avons en cours V. O_2 = V. O_2 = 700 litres par kg de soufre.

Volume des fumées :

Dans ce cas les fumées seront constituées uniquement par le V. O_2 et par le V.N_2 de l'aire de combustion nous avons donc :

$V.F = V.SO_2 + V.N_2$
$V.F = 700 + 2\ 633 = 3333$ litres $= 3{,}333\ m^3\ (n)$

Chaleur dégagée par 1 kg de soufre en quantité :

Chaleur dégagée par un automne de soufre

$$\frac{(169{,}8) \times 1000}{32} = 2\ 181 \text{ kcal / kg de soufre .}$$

ETUDE DE LA COMBUSTION DE L'HYDROGENE :

Réaction chimique fondamentale : (Vapeur) + 60 kcal

H_2 + ½ O_2 = H_2O (eau) + 57 kcal
2g 16g = 18g
22.4 L ½ x 22.4 L = 11.2 L 22.4 L

Nous notions dans ce cas que 1 molécule de H_2 réagit avec ½ molécule de O_2 pour produire 1 molécule de H_2O (eau) (nous avons précisé que l'eau était à l'état de vapeur d'eau H_2O). Au cours de la réaction, la température est très élevée ; l'eau est donc vaporisée, et cela explique qu'il a fallu lui fournir de la chaleur. Pour faire passer 1 kg d'eau à 100 °C à l'état de vapeur à 10° C , il faut fournir 539 kcal. La vapeur restituera cette chaleur quand elle se condensera en se refroidissant.

H2 + ½ O2 = H2O (liquide) + 67.4 kcal
2g 16g 18g
11.2 L

Cette équation ne differt de 1ére que par la chaleur dégagée qui est alors de 67.4 kcal au lieu de 57.7. la différence s'explique par le fait que 22.4 L de vapeur d'eau soit 18g.

En se condensant, ont libéré :

$$\frac{539 \times 18}{1000} = 9.7 \text{ kcal}$$

donc
57.5 + 9.7 = 67.4 kcal.

Volume d'oxygène ($V.O_2$) :

$$V.O_2 = \frac{11.2 \times 1000}{2} = 5600 \text{ litres} = 5.600 \text{ m}^3 \text{ (n)}$$

Volume d'azote ($V.N_2$) :

$$V.N_2 = \frac{5600 \times 79}{21}$$

$V.N_2$ = 5600 x 3.76 = 21066 litres =2 1.066 m^3 (n)

Volume d'air de combustion (V. air) :

V. air = V. O_2 + VN_2

V. air = 5600 + 21066 = 26666 litres = 26.666 m^3 (n)

On peut également écrire

$$V.\ air = \frac{5600 \times 100}{21}$$

= 5600 x 4.76 = 26666 litres = 26.666 m^3 (n)

Volume d'eau produit (V.$H_2O\nearrow$ ou VH2 O$\searrow$) :

Les deux cas sont à considérer

- celui ci de l'eau à l'état vapeur $H_2O\nearrow$ qui nous permet d'écrire :

$$V.\ H_2O = \frac{22.4 \times 1000}{2} \quad 11200\ litres = 1.200\ m^3\ (n)$$

on notera dans ce cas que le volume de la vapeur est double de celui de l'oxygène.
Celui de l'eau à l'état liquide ($H_2O\downarrow$) nous permet d'écrire.

$$H_2O\downarrow = \frac{18 \times 1000}{2} = 9\ kg\ d'eau = 9\ litres.$$

Donc bien noter que la combustion de l'hydrogène va entraîner la formation de vapeur d'eau qui en se condensant ruissellera sur les parois froides (cheminées mal calorifugées par ex.).

Volume des fumées :

On considérera les deux cas : H_2O (vapeur) et H_2O (liquide)

- *Cas de H_2O vapeur : les fumées seront uniquement constituées par $H_2O\nearrow$ et par le N_2 de l'air de combustion et nous aurons :*
  V.f.h = V H_2O + V. N_2
  V.f.h = 11200

On appelle ces fumées humides (f.h)

- *Cas de H_2O liquide : l'eau étant condensée les fumées sont constituées par seul volume d'azote de l'air de combustion et l'on aura alors :*
  V.f.s = V.N_2 = 21066 litres = 21,066 m^3(n)

Ces fumées sont appelées fumées sèches (f.s)

Quantité de chaleur dégagée par 1 kg l'hydrogène :

Les deux cas sont à envisager :

H_2O ↗ *à l'état de vapeur*

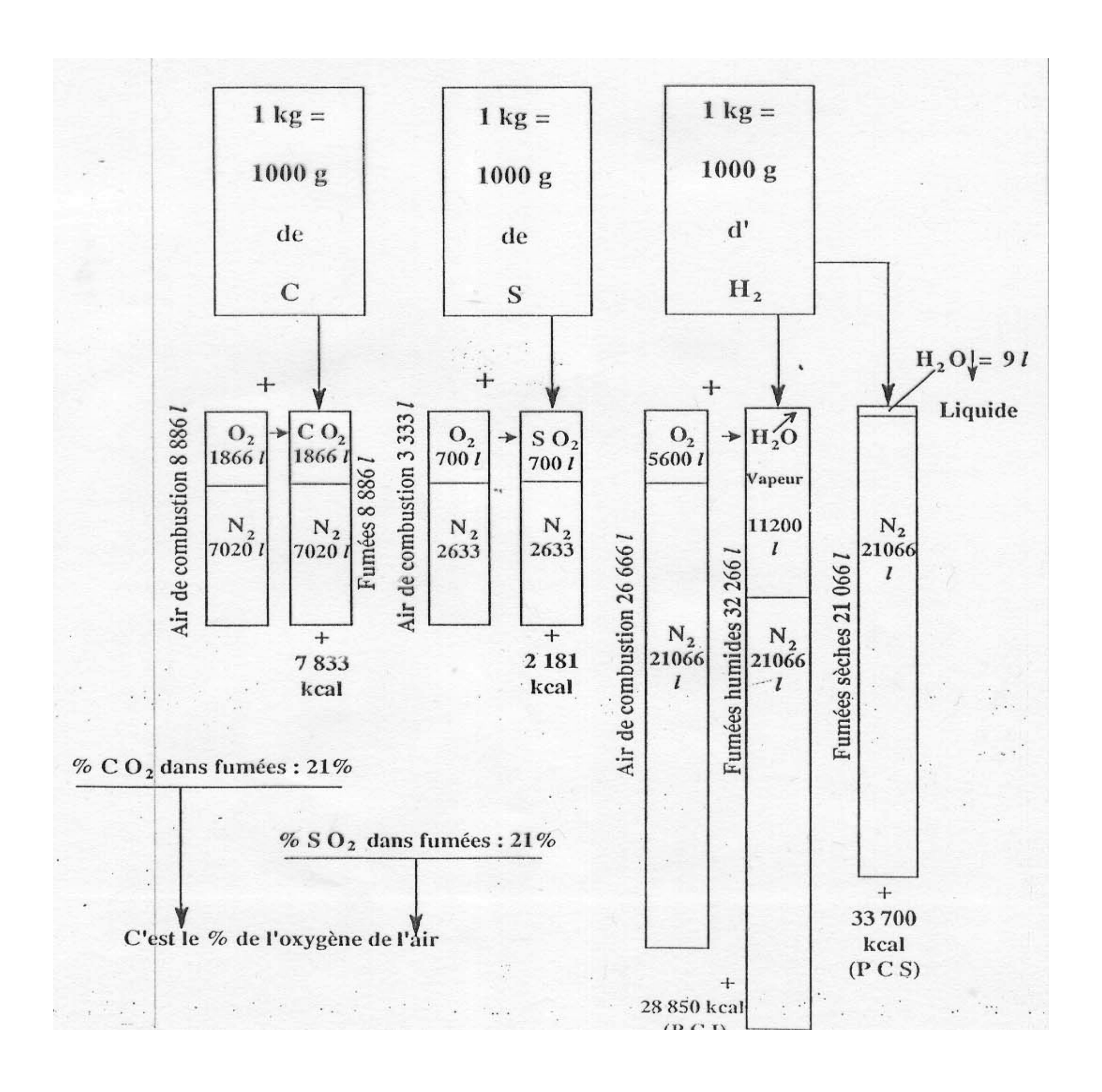
$$\frac{57{,}7 \times 1000}{2} = 28850 \text{ kcal /kg}$$

H_2O *à l'état d'eau condensée :*

$$\frac{67{,}4 \times 1000}{2} = 33700 \text{ kcal /kg}$$

Et ce qui est intéressant pour études c'est le H_2O à l'état de vapeur. Donc la base 28850 kcal /kg
On ne récupère donc pas la chaleur latente de vaporisateur soufflé dans les chaudières à condensation dont ici l'on mesure mieux l'intérêt.

SCHEMA DE LA COMBUSTION DU CARBONE, DU SOUFRE ET L'HYDROGENE



COMBUSTION OXYDANTE

La combustion neutre n'est jamais réalisée dans la pratique pour avoir une combustion complète, il faut un excès d'air de combustion. La combustion est dite oxydante. Cela se traduira par la présence dans les fumées de cet air dont l'oxygène n'aura pas réagi.

Ainsi aux volumes des divers oxydes (CO_2 – SO_2 – H_2O et de N_2) viendra s'ajouter le volume d'excès d'air.

Exemple combustion de 1kg de carbone avec 30% d'excès d'air.

Volume d'air neutre de combustion : 8,886 m^3 (D)

Volume d'air en combustion oxydante :

$$8{,}886\ m^3\ (n) + \frac{8{,}886\ m^3\ (n) \times 30}{100} = 8{,}886\ m^3\ (n) + 2{,}665\ m^3\ (n) = 11{,}551\ m^3\ (n)$$

Les fumées sont alors constituées du :

$V.CO_2$ (neutre) + VN_2 (neutre) + volume d'air en excès.

1,866 m^3 (n) + 7,020 m^3 (n) + 2,665 m^3 (n) = 11,551 m^3 (n)

COMBUSTION REDUCTRICE

Ce type de combustion intéresse plus spécialement le carbone qui a un comportement particulier et qui dans cette condition donne naissance à un gaz intermédiaire combustible : l'oxyde de carbone ou monoxyde de carbone (CO)

La réaction incomplète s'écrit alors :

$$C + 1/2\ O_2 \longrightarrow CO + 110\ kj \text{ soit } 26,3\ kcal$$

12 16g 28g

11,2 l 22,4 l

Comparons deux résultats:

- *Combustion complète 94 kcal*
- *Combustion incomplète 26 kcal*

La différence est importante et de plus l'oxyde de carbone est un gaz extrêmement dangereux.

- *Masse volumique de CO* $1,250\ kg / m^3\ (n)$
- *Masse volumique de l'air* $1,293\ kg / m^3\ (n)$

$$\frac{1,250\ kg / m^3\ (n)}{1,293\ kg / m^3\ (n)} = 0,96$$

De densité légèrement inférieure à celle de l'air ce gaz se rependra aisément dans local.

ETUDE DE LA COMBUSTION D'UN F.O.D

Pour faire l'étude de la combustion d'un F.O.D, il est indispensable de connaître la composition en poids des constituants : carbone, hydrogène, soufre.

Nous retiendrons pour le cas du F.O.D :

	- 85,7 % de carbone	soit 857 g
	- 13,6 % d'hydrogène	soit 136 g
	- 0,3 % de soufre	soit 3 g
	- 0,4 % d'inertes	soit 4 g
Total :	100 %	1000 g

L'étude va consister à calculer dans le cas d'une combustion neutre :

- *La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion de 857 g de carbone, de 136 g d'hydrogène et de 3 g de soufre.*
- *La quantité d'azote accompagnant l'oxygène indispensable pour connaître le volume total des fumées.*
- *Le volume de CO_2 (combustion du carbone).*
- *Le volume de H_2O (vapeur) – (combustion de l'hydrogène).*
- *Le volume de SO_2 (combustion du soufre).*
- *Le volume total des fumées, c'est à dire :*

$$V.CO_2 + V.H_2O + V.SO_2 + V.N_2$$

COMBUSTION DU CARBONE – C (857 g)

Réaction chimique fondamentale :

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

12 g (16 × 2) 12 + (16 × 2)

44 g 44 g

22,4 l 22,4 l

Volume d'oxygène nécessaire à cette combustion :

$$V.O_2 = \frac{22{,}4\ l \times 857\ g}{12\ g} = 1599{,}7\ l = 1{,}6\ m^3\ (n).$$

Volume d'azote :

$$V.\ de\ N_2 = \frac{1{,}60\ m^3\ (n) \times 79}{21} = 6{,}01\ m^3\ (n).$$

Volume d'air nécessaire pour brûleur 857 g de carbone :

$$V.a = VO_2 + VN_2$$

$$1{,}60\ m^3\ (n) + 6{,}01\ m^3\ (n) = 7{,}61\ m^3\ (n)$$

Volume de CO_2 produit :

$$V.O_2 = \frac{22{,}4\ l \times 857\ g}{12\ g} = 1599{,}7\ l = 1{,}6\ m^3\ (n).$$

Volume des fumées est égal au :

$$V.\ CO_2 + V.N_2$$

$$1{,}60\ m^3\ (n) + 6{,}01\ m^3\ (n) = 7{,}61\ m^3\ (n)$$

COMBUSTION DE L'HYDROGENE – H_2 (136 g)

Réaction chimique fondamentale :

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$$

2 g   16 g   18 g

11,2 l   22,4 l

Volume d'oxygène nécessaire à cette combustion :

$$V.O_2 = \frac{11{,}2\ l \times 136\ g}{2\ g} = 761{,}6\ l = 0{,}76\ m^3\ (n).$$

Volume d'azote :

$$V.N_2 = \frac{0{,}76\ m^3\ (n) \times 79}{21} = 2{,}85\ m^3\ (n).$$

Volume d'air nécessaire pour brûleur 136 g d'hydrogène :

$$V.a = VO_2 + V.N_2$$

$$0{,}76\ m^3\ (n) + 2{,}85\ m^3\ (n) = 3{,}61\ m^3\ (n)$$

Volume de vapeur d'eau produite :

$$V.H_2O = \frac{22{,}4\ l \times 136\ g}{2\ g} = 1523\ l = 1{,}52\ m^3\ (n).$$

Volume de fumées produites (Fumées humides):

$$V.\ H_2O + V.\ N_2$$

$$1{,}52\ m^3\ (n) + 2{,}85\ m^3\ (n) = 4{,}37\ m^3\ (n)$$

Si l'on condense cette vapeur d'eau nous obtenons :

$$\frac{18\ g \times 136\ g}{2\ g} = 1224\ g \quad \text{soit } 1{,}244\ kg$$

Les fumées ne contiennent que l'azote soit 2,85 m^3 (n), ce sont des fumées sèches.

COMBUSTION DE SOUFRE - S – (3 g) :

Réaction chimique fondamentale :

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

32 g 22,4 l 22,4 l

Volume d'oxygène nécessaire à cette combustion :

$$V.O_2 = \frac{22{,}4\ l \times 3\ g}{32\ g} = 2{,}1\ l = 0{,}002\ m^3\ (n).$$

Volume d'azote :

$$V.\ N_2 = \frac{2{,}1\ l \times 79}{21} = 7{,}9\ l = 0{,}008\ m^3\ (n).$$

Volume d'air nécessaire pour brûleur 3 g de soufre :

$$V.a = VO_2 + V.N_2$$

$$0{,}002\ m^3\ (n) + 0{,}008\ m^3\ (n) = 0{,}010\ m^3\ (n)$$

Volume d'anhydride sulfureux (SO_2) produit :

$$V.SO_2 = \frac{22{,}4\ l \times 3\ g}{32\ g} = 2{,}1\ l = 0{,}002\ m^3\ (n).$$

Volume des fumées est égal au :

$$V.\ SO_2 + V.N_2$$

$$0{,}002\ m^3\ (n) + 0{,}008\ m^3\ (n) = 0{,}010\ m^3\ (n)$$

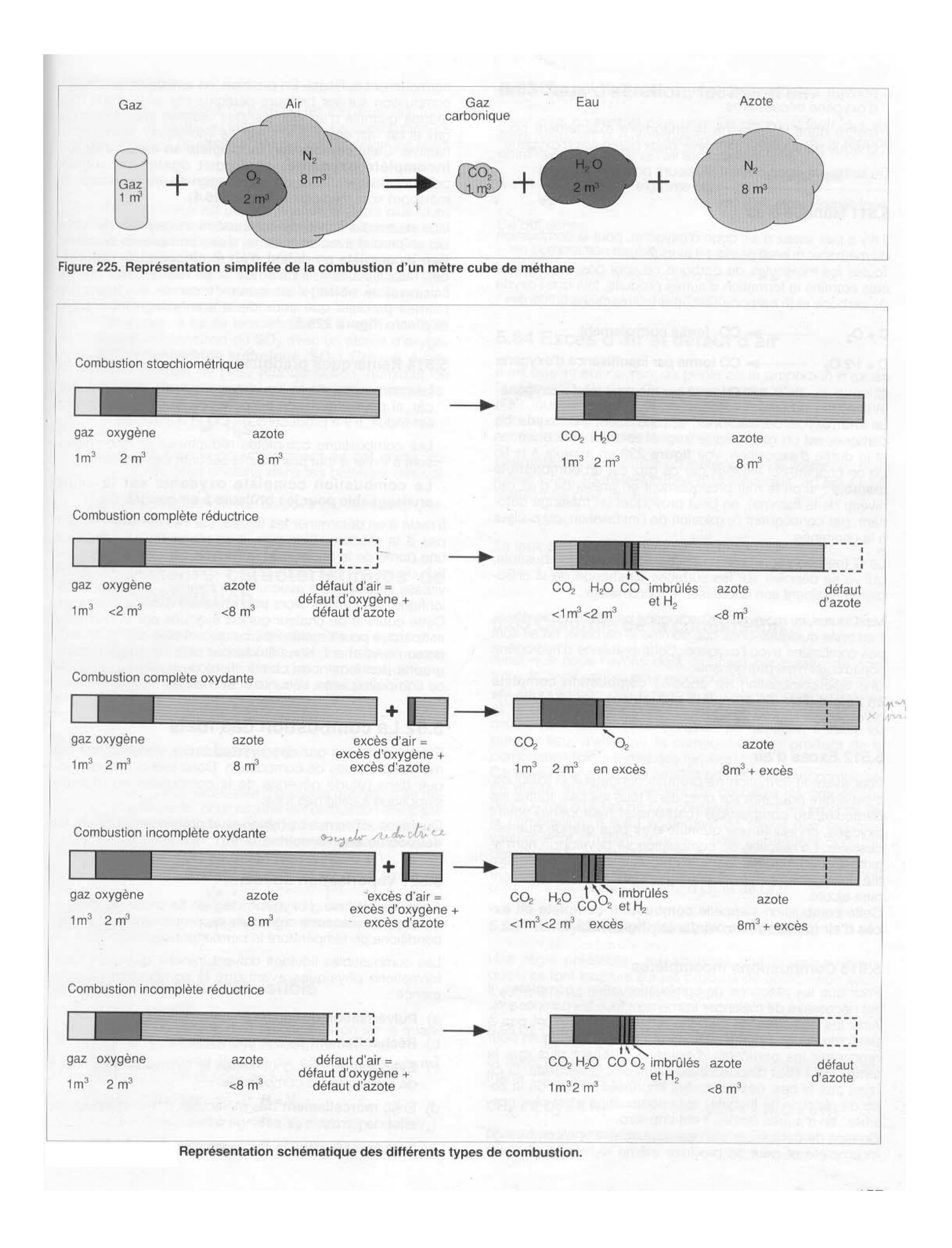
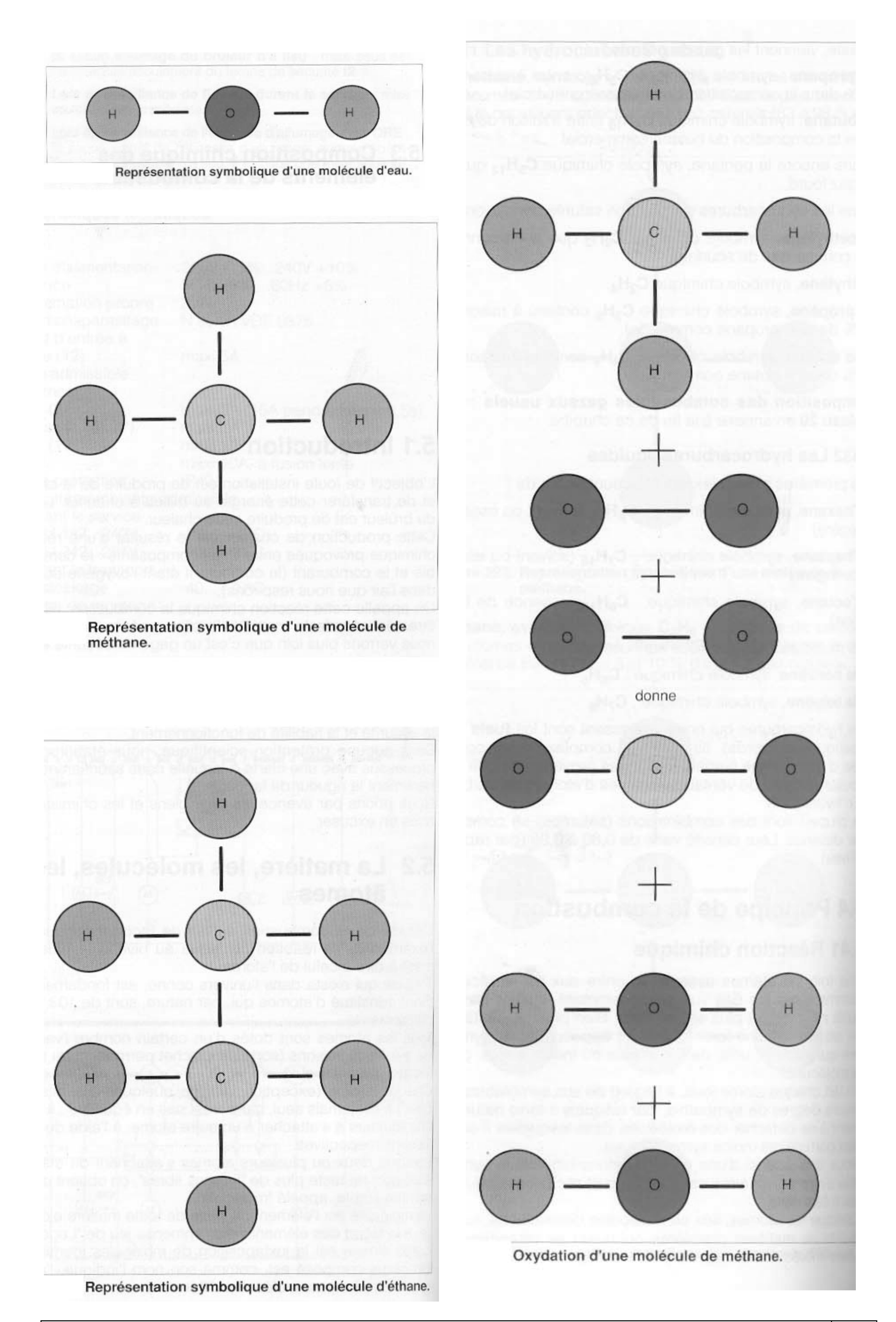


Figure 225. Représentation simplifiée de la combustion d'un mètre cube de méthane

Représentation schématique des différents types de combustion.



Représentation symbolique d'une molécule d'eau.

Représentation symbolique d'une molécule de méthane.

Représentation symbolique d'une molécule d'éthane.

Oxydation d'une molécule de méthane.

INCONVENIENTS DE LA PRESENCE DU SOUFFRE DANS LE F.O.D:

Anhydride : corps qui peut donner naissance à un acide en se combinant avec l'eau.

Combiné avec l'oxygène de l'air en excès :

$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow SO_3$ *(Anhydride suffurique)*

Combiné avec la vapeur d'eau résultant de la combustion de l'hydrogène :

$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$ *(Acide suffurique)*

Point de rosée acide entre 120°et 160°
En reprenant les résultants précédents nous savons que pour brûler 1kg de F.O.D. il faut :
Total de l'air de combustion :

$7{,}61\ m^3 (n) + 3{,}61\ m^3 (n) + 0{,}010\ m^3 (n) = 11{,}23\ m^3 (n).$

Et nous obtenons :

Le total des fumées humides :

$7{,}61\ m^3 (n) + 4{,}37\ m^3 (n) + 0{,}010\ m^3 (n) = 11{,}99\ m^3 (n).$

Le total des fumées sèches :

Volume des fumées humides – Volume de vapeur d'eau

$11{,}99\ m^3 (n) - 1{,}52\ m^3 (n) = 10{,}47\ m^3 (n).$

Le volume de CO_2 + SO_2 :

$1{,}60\ m^3 (n) + 0{,}002\ m^3 (n) = 1{,}602\ m^3 (n).$

La teneur en CO_2 + SO_2 dans les fumées sèches :

$$\frac{1{,}602\ m^3 (n)}{10{,}47\ m^3 (n)} = 0{,}153 \quad 15{,}3\ \%$$

15,3% sera la teneur maximum de CO_2 contenu dans les fumées sèche.

Si le volume de fumées sèches augmente, ce qui sera toujours le cas en combustion normale, la combustion du F.O.D, se fait toujours avec un excès d'air,

$$\text{Le pourcentage} = \frac{V.CO_2}{V.F.\ \text{sèches}} \times 100$$

Diminuera, c'est l'interprétation de ce résultat qui permettra d'affiner le réglage.

ETUDE DE LA COMBUSTION DU METHANE (CH_4)

Réaction chimique fondamentale :

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

12 g + 4 g ⟶ 44 g + 36 g

16 g + 64 g

22,4 l + 44,8 l ⟶ 22,4 l + 44,8 l

Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

$$C \longrightarrow 393\ kJ$$

$$H_4\ 204\ kJ \times 2 = \frac{480\ kJ}{873\ kJ} = 209\ kcal = 243\ Wh$$

Pouvoir calorifique inférieur d'un m^3 (n) de CH_4 :

$$\frac{243\ Wh \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 10848\ Wh/m^3\ (n)\ \text{ou}\ 10{,}84\ kWh/m^3\ (n)$$

Volume de vapeur d'eau produite par m^3 (n) de gaz :

$$\frac{44{,}8\ l \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 2000\ l = 2\ m^3\ (n)$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est 2253 kJ soit 539 kcal /kg

Quantité de chaleur récupérée en condensant la vapeur d'eau dégagée par la combustion d'un m^3 (n) de CH_4 :

$$\frac{2253\ kJ \times 1607\ g}{1000\ g} = 3620\ kJ\ \text{soit}\ 1{,}007\ kWh$$

Pouvoir calorifique supérieur d'un m^3 (n) de CH_4 :

$$10{,}84\ kWh + 1{,}007\ kWh = 11{,}847\ kWh/m^3\ (n)$$

Volume d'oxygène nécessaire à la combustion d'un m^3 (n) de gaz :

$$V.O_2 = \frac{44{,}8\ l \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 2000\ l\ \text{soit}\ 2\ m^3\ (n).$$

Volume d'azote :

$$V.O_2 = \frac{2000 \times 79}{21} = 7523 \quad \text{soit } 7{,}5\ m^3\ (n).$$

Volume d'air de combustion :

$$V.a = V.O_2 + V.N_2$$
$$2\ m^3\ (n) + 7{,}5\ m^3\ (n) = 9{,}5\ m^3\ (n)$$

Volume de CO_2 produit :

$$V.CO_2 = \frac{22{,}4\ l \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 1000\ l = 1\ m^3\ (n).$$

Volume des fumées sèches :

$$V.Fs = V.CO_2 + V.N_2$$
$$1\ m^3\ (n) + 7{,}5\ m^3\ (n) = 8{,}5\ m^3\ (n)$$

Volume des fumées humide :

$$V.Fh = V.Fs + V.N_2O$$
$$8{,}5\ m^3\ (n) + 2\ m^3\ (n) = 10{,}5\ m^3\ (n)$$

Pourcentage maximum de CO_2 contenu dans les fumées sèches :

$$\%\ CO_2 = \frac{V.\ CO_2}{V.\ Fs} = \frac{1\ m^3\ (n)}{8{,}5\ m^3\ (n)} = 0{,}117 = 11{,}7\ \%$$

Masse volumique du méthane:

$$\frac{16\ l \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 714{,}28\ /m^3\ (n) \quad \text{soit } 0{,}714\ kg\ /m^3\ (n)$$

Calcul de la densité :

$$\frac{\text{Masse volumique du } CH_4}{\text{Masse volumique de l'air}} = \frac{0{,}714\ kg\ /m^3\ (n)}{1{,}293\ kg\ /m^3\ (n)} = 0{,}55$$

Attention les calculs ci-dessus sont effectués à partir du méthane à l'état pur.

Dans la réalité le gaz naturel (de Lacq) que l'on connaît sous appellation de méthane est en fait composé de :

- Méthane	CH_4	=	97,3 %
- Ethane	C_2H_6	=	2,1 %
- Propane	C_3H_8	=	0,2 %
- Butane	C_4H_{10}	=	0,1 %
- Azote	N_2	=	0,3 %

<u>ETUDE DE LA COMBUSTION DU PROPANE</u> (C_3H_8)

Réaction chimique fondamentale :

$$C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O$$

36 g + 8 g + 160g → 132 g + 72 g

204 g → 204 g

22,4 l + 112 l → 67,2 l + 89,6 l

Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

$C_3 \longrightarrow 393\ kJ \times 3 = 1179\ kJ$

$H_8 \longrightarrow 240\ kJ \times 4 = 960\ kJ$

873 kJ = 512 kcal = 595 kw

Pouvoir calorifique inférieur d'un m³ (n) de C_3H_8 :

$$\frac{595\ Wh \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 26562\ Wh/m^3\ (n)\ \text{ou}\ 26{,}5\ kWh/m^3\ (n)$$

Pouvoir calorifique inférieur d'un kg de C_3H_8 :

$$\frac{595\ Wh \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 26562\ Wh/m^3\ (n)\ \text{ou}\ 26{,}5\ kWh/m^3\ (n)$$

Pouvoir calorifique inférieur d'1kg de C_3H_8 :

$$\frac{595\ Wh \times 1000\ g}{44\ g} = 13522\ Wh/kg\ \text{ou}\ 13{,}5\ kWh/kg$$

Volume de vapeur d'eau produite par m³ (n) de gaz :

$$\frac{89{,}6\ l \times 1000}{22{,}4\ l} = 4000\ l = 4\ m^3\ (n)$$

Masse d'eau récupérable par m^3 (n) de gaz :

$$\frac{72\ g \times 1000\ l}{22{,}4\ l} = 3214\ g$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est 2253 kJ, soit 539 kcal/ kg

Quantité de chaleur récupérée en condensant la vapeur d'eau dégagée par la combustion d'1 m^3 (n) de C_3H_8 :

$$\frac{2253\ kJ \times 1636\ g}{1000\ g} = 3686\ kJ\ \text{ soit } 1{,}025\ kWh$$

Pouvoir calorifique supérieur de 1 kg de C_3H_8 :

$$13{,}5\ kWh + 1{,}025\ kWh = 14{,}525\ kWh\ /kg$$

Volume d'oxygène nécessaire à la combustion de 1kg de propane :

$$V.O_2 = \frac{112\ l \times 1000\ g}{44\ g} = 2545{,}4\ l\ \text{ soit }\ 2{,}5\ m^3\ (n).$$

Volume d'azote :

$$V.N_2 = \frac{2{,}5\ m^3\ (n) \times 79}{21} = 9{,}40\ m^3\ (n)$$

Volume d'air de combustion :

$$V.a = V.O_2 + V.N_2$$
$$2{,}5\ m^3\ (n) + 9{,}4\ m^3\ (n) = 11{,}9\ m^3\ (n)$$

Volume de CO_2 produit :

$$V.CO_2 = \frac{67{,}2\ l \times 1000\ g}{44\ g} = 1527{,}2\ l\ \text{ soit }\ 1{,}52\ m^3\ (n).$$

Volume de fumées sèches :

$$V.Fs = V.CO_2 + V.N_2$$
$$1{,}52\ m^3\ (n) + 9{,}40\ m^3\ (n) = 10{,}92\ m^3\ (n)$$

Volume de fumées humides :

V.Fh = V.Fs + V.N$_2$O

$$10{,}92\ m^3\,(n) + 2{,}036\ m^3\,(n) = 12{,}95\ m^3\,(n)$$

Pourcentage maximum de CO_2 contenu dans les fumées sèches :

$$\%\ CO_2 = \frac{V.\ CO_2}{V.\ Fs} = \frac{1{,}52\ m^3\,(n)}{10{,}92\ m^3\,(n)} = 0{,}139 = 13{,}9\ \%$$

Calcul de la densité :

$$\frac{\text{Masse volumique du } C_3H_4}{\text{Masse volumique de l'air}} = \frac{1{,}964\ kg\,/m^3\,(n)}{1{,}293\ kg\,/m^3\,(n)} = 1{,}51$$

Attention les calculs ci-dessus sont effectués à partir du méthane à l'état pur.

Dans la réalité le propane commercial se composé de :

- Méthane	C_2H_4	=	0,5 %
- Ethane	C_2H_6	=	2 %
- Propylène	C_3H_6	=	30 %
- Propane	C_3H_8	=	65 %
- Butane	C_4H_{10}	=	2 %

COMBUSTION REDUCTRICE

C'est une combustion incomplète qui se produit quand l'oxygène dans l'air de combustion est en quantité insuffisante.

Ce type de combustion intéresse plus spécialement le carbone qui à un comportement particulier et qui dans cette condition donne naissance à un gaz intermédiaire combustible : l'oxyde de carbone au monoxyde de carbone (CO)

La réaction incomplète s'écrit alors :

C	+	½ O2 ⟶	CO	+	110 KJ	soit 26.3 kcal
12g		16g	28g			
		11.2L	22.4 L			

dans ce cas nous constatons que 12g de C se combinent avec une ½ molécule d'oxygène, soit 11.2 L pour donner naissance à 1 molécule 28 g, soit 22.4 L et en dégagement une quantité de chaleur égale à 110 KJ soit 26.3 kcal.

Comparons deux résultats :

- *Combustion complète* *94 kcal*
- *Combustion incomplète* *26 kcal*

La différence est importante et de plus l'oxyde de carbone est un gaz extrêmement dangereux.

- *Masse volumique de CO*
- *Masse volumique de l'air*

$$\frac{1.250\ kg/m^3\ (n)}{1.293\ kg/m^3(n)} = 0.96$$

De densité légèrement inférieure à celle de l'air ce gaz se répandra aisément dans un local.

Volume des fumées :

- *2 cas se présentent :*

a. cas de $H2O$ ↗ à l'état vapeur :

les fumées seront uniquement constituées de la vapeur d'eau et de l'azote de l'air de combustion. C'est ce que l'on appellera le volume des fumées humides :

V. fh = V.h_2o ↗ + V.N_2
V. fh = 11.20 m3(n) + 20.066 m3(n) = 32.266 m^3(n)

b. Cas de H2O liquide :

L'eau étant condensée, les fumées sont constitué par le seul volume d'azote de l'air de combustion. C'est ce que l'on appellera le volume des fumées sèches.

V. fs = V. N_2 = 21.06 $m(n)^3$

Quantité de chaleur dégagée par 1 kg d'hydrogène :

- *2 cas sont à envisager :*

a. ***H_2O ↗ à l'état vapeur, nous avons*** *:*

$$\frac{57.4 \text{ kcal} \times 1\,000 \text{ g}}{2\text{g}} = 28\,700 \text{ kcal /kg}$$

b. ***H_2O ↘ à l'état d'eau condensée, nous avons:***

$$\frac{67.1 \text{ kcal} \times 1\,000 \text{ g}}{2\text{g}} = 33\,550 \text{ kcal /kg}$$

dans les problèmes classiques de combustion, l'eau dans les fumées est à l'état de vapeur ; on ne récupère donc pas la chaleur latente de vaporisation. Sauf dans les chaudières à condensation dont ici l'on mesure mieux l'intérêt.

2.1 Pertes par chaleur sensible des fumées :

Ces pertes sont, de loin, les plus importantes. Elles représentent la chaleur emportée par les gaz chauds sortant de la cheminée. Cette quantité de chaleur proportionnelle dépend de la composition du gaz.

Une augmentation de ces pertes peut provenir d'un excès d'air excessif qui peut être dû à :

- *Un mauvais réglage ;*
- *Des problèmes d'entretien tels que des entrées d'air parasite, une mauvaise pulvérisation du combustible ou une mauvaise distribution de l'air.*

Une augmentation des pertes par les fumées peut également provenir d'un accroissement de la température de sortie des fumées dû à :

- *Une diminution de l'excès d'air,*
- *Une chaudière encrassée : les dépôts internes (tartre) et externes(suies) limitent le transfert de chaleur entre la vapeur et les fumées. Celles-ci doivent donc être plus chaudes pour assurer les mêmes températures d'eau ou de vapeur.*

Les moyens de pallier à ces causes d'augmentation des pertes sont traités dans le chapitre 3.

Les pertes par chaleur sensible des fumées en pourcentage du PCI peuvent être estimées par l'utilisation de la formule suivante :

$$\text{Pertes (en \% du PCI)} = K \frac{T_f - T_a}{CO_2}$$

Ou :

T_f = *température des fumées*
T_a = *température de l'air comburant*
CO_2 = *teneur en CO2 des fumées(en %)*
K = *coefficient variant avec la combustible*
$K = 0.7$ *pour le charbon*
$K = 0.6$ *pour les fiouls*
$K = 0.5$ *pour le GPL (butane et propane)*

Les pertes par les fumées peuvent être aussi, directement lues sur les tables 2.2 à 2.5 pour différents combustibles, ces pertes sont évaluées en fonction de la différence de la température.

N.B *les pertes par chaleur sensible des fumées incluent toutes les pertes chaleur sensible, y compris celle de la vapeur d'eau. Cependant la vapeur, latente de vaporisation de l'eau n'est pas prise en considération dans le calcul de ces pertes, vu que le rendement est reporté au pouvoir calorifique inférieur(et non PCS).*

Température des fumées et la température ambiante, et de l'un des paramètres suivants : l'excès d'air, la teneur en CO2 ou la teneur en O2 des fumées.

Ces deux méthodes sont illustrées dans la table 2.1

Table 2.1 – exemple de calcul des pertes par chaleur sensible fumées

L'analyse des fumées a donné une teneur de CO2 de 11%. La température ambiante est de 25°C et celle des fumées est de 300 °C, sachant que le combustible utilisé est le fioul lourd N°2, évaluer le pourcentage des pertes par chaleur sensible des fumées.

1. Méthode des formules

Pour le fioul, k = 0.6, la formule précédente donne :

$$\text{Pertes (\%PCI)} = 0.6 \times \frac{300 - 25}{11} = 15\%$$

2. Méthodes des tableaux
l'interpolation entre les valeurs correspondant aux lignes 270 et 280 °C et la colonne CO2 = 11% de la table 2.2 (la différence entre la température des fumées et la température ambiante est de 275°C pour ce cas), donne pertes (%) = 15%

on lit en même temps un excès d'air de 44% et une teneur en O2 de 6.7%.
dans le cas ou il y a une différence, en considéreras que les valeurs données par les tables sont plus précises que celles des formules.

Calcul des pertes par la chaleur sensible des fumées
Combustible: Fioul lourd N°2

Fumees seches:													
Gaz Carbonique CO2 %	10.50	11.00	11.50	12.00	12.50	13.00	13.50	14.00	14.50	15.00	15.50	16.00	16.16
Oxygene O2 %	7.4	6.7	6.1	5.4	4.8	4.1	3.5	2.8	2.2	1.5	0.9	0.2	0.0
Exces d'air %	51	44	38	33	28	23	19	15	11	7	4	1	0
Difference temperature des fumees - temperature ambiante C	Pertes par chaleur sensible des fumees en % PCI												
150	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	7.1	6.9	6.6	6.5	6.3	6.1	5.9	5.9
160	9.1	8.7	8.4	8.1	7.8	7.6	7.3	7.1	6.9	6.7	6.5	6.3	6.3
170	9.7	9.3	8.9	8.6	8.3	8.0	7.8	7.5	7.3	7.1	6.9	6.7	6.7
180	10.2	9.8	9.5	9.1	8.8	8.5	8.2	8.0	7.7	7.5	7.3	7.1	7.1
190	10.8	10.4	10.0	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.2	7.9	7.7	7.5	7.5
200	11.4	10.9	10.5	10.1	9.8	9.4	9.1	8.9	8.6	8.4	8.1	7.9	7.9
210	11.9	11.5	11.0	10.6	10.3	9.9	9.6	9.3	9.0	8.8	8.5	8.3	8.2
220	12.5	12.0	11.6	11.1	10.7	10.4	10.1	9.7	9.5	9.2	8.9	8.7	8.6
230	13.1	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	10.5	10.2	9.9	9.6	9.4	9.1	9.0
240	13.7	13.1	12.6	12.1	11.7	11.3	11.0	10.6	10.3	10.0	9.8	9.5	9.4
250	14.2	13.6	13.1	12.6	12.2	11.8	11.4	11.1	10.8	10.4	10.2	9.9	9.8
260	14.8	14.2	13.7	13.2	12.7	12.3	11.9	11.5	11.2	10.9	10.6	10.3	10.2
270	15.4	14.7	14.2	13.7	13.2	12.7	12.3	12.0	11.6	11.3	11.0	10.7	10.6
280	15.9	15.3	14.7	14.2	13.7	13.2	12.8	12.4	12.0	11.7	11.4	11.1	11.0
290	16.5	15.8	15.2	14.7	14.2	13.7	13.3	12.9	12.5	12.1	11.8	11.5	11.4
300	17.1	16.4	15.8	15.2	14.7	14.2	13.7	13.3	12.9	12.5	12.2	11.9	11.8
320	18.2	17.5	16.8	16.2	15.6	15.1	14.6	14.2	13.8	13.4	13.0	12.7	12.6
340	19.3	18.6	17.9	17.2	16.6	16.1	15.5	15.1	14.6	14.2	13.8	13.5	13.4
360	20.5	19.7	18.9	18.2	17.6	17.0	16.5	16.0	15.5	15.0	14.6	14.3	14.1
380	21.6	20.7	20.0	19.2	18.6	17.9	17.4	16.8	16.3	15.9	15.5	15.0	14.9
400	22.8	21.8	21.0	20.2	19.5	18.9	18.3	17.7	17.2	16.7	16.3	15.8	15.7

2.2 Autre perte :

les autres types de pertes sont moins importantes et certains d'entres elles sont difficiles à calculer. On se contentera ici de donner un ordre de grandeur de ces pertes, de mentionner leur origine et les moyens de les réduire.

2.2.1. perte par imbrûlés :

Ces pertes proviennent des imbrûlés, solides(carbone) ou gazeux(CO, CH_4), présents dans les fumées ou les cendres. Ces imbrûlés sont dus à un manque d'air ou à un mauvais mélange air-combustible. Avec un bon réglage(voir chapitre 3), ces pertes doivent être réduites à moins de 0.5%.

Quelques données à retenir :

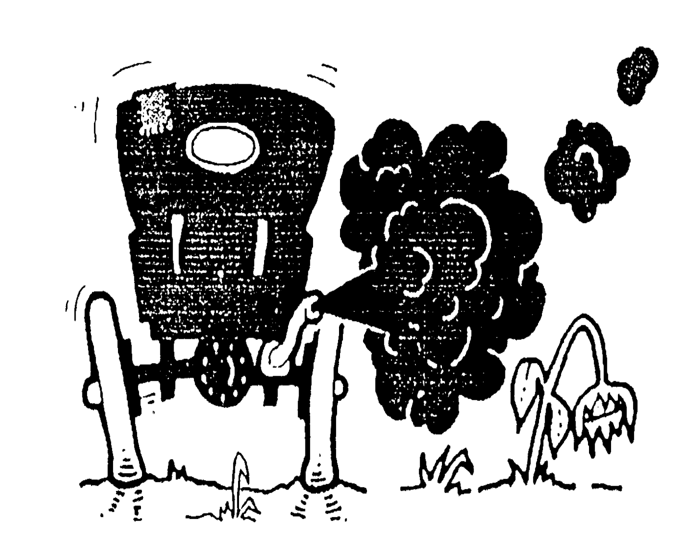
Teneurs maximales autorisées :

Dans une pièce 0.01%.
Dans un conduit de fumées 0.1%.

Dans la profession on se donne une teneur maximale de 0.03 %soit 300 ppm (300 parties par million).

L'hydrogène et le soufre ne donnent lieu a aucun stade intermédiaire et se manifestent alors sous formes d'imbrûlés gazeux ou solides.

<u>ATTENTION</u>



Quelques données à retenir :

Teneurs maximales autorisées :

a) Dans une pièce 0,01 %
b) Dans un conduit de fumées 0,1 %

Dans la profession on se donne une teneur maximale de 0 ,03 % soit 300 ppm (300 parties par million).

L'hydrogène et le soufre ne donnent lieu à aucun stade intermédiaire et se manifestent alors sous forme d'imbrûlés gazeux ou solides.

Evaluation I ***DUREE : 2 H***

1. *Qu'est ce qu'un combustible ?*
2. *Qu'est ce que un pouvoir calorifique ?*
3. *Comment obtient ou les combustibles liquides ?*
4. *Qu'est ce qu'un corps simple ? donner des exemples*
5. *Qu'est ce qu'un corps composé ? donner des exemples*

Evaluation II	***DUREE : 2 H***

1. *Quel est l'utilisé de l'air comburant ?*
2. *Quels sont les produits de combustion ?*
3. *Qu'est ce qu'une combustion réductrice ?*
4. *Qu'est ce qu'une combustion oxydante ?*

Evaluation III **DUREE : 4 H**

Faire l'étude de la combustion de 2,5 kg de FOD dont les composants sont :

85% de carbone

14,3% d'hydrogène

0,3% de soufre

0,4% d'inertes

100%

Evaluation IV	***DUREE : 1 H***

On a : - température de fumée 240℃

- *température ambiante 21℃*
- *CO_2 = 12,7%*
- *K = 0,6*

Calculer les pertes par les fumées

Calculer le rendement

Evaluation V **DUREE : 3 H**

Faire l'étude de la combustion de 1 kg propane

$C_3 H_8$ + ? ————→ ? + ? + 2139 Kj

Module : combustibles et Combustion

GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES

I. *TP 4 : intitulé du TP prérégler le brûleur*

I.1. Objectif(s) visé(s) :

- *Réglage de l'air comburant sur le volet d'air du brûleur*
- *Réglage de la pompe à fioul.*

I .2. Durée du TP:

8 H

I 3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- *Chaudière*
- *Brûleur*
-
-

manomètre de pression du fioul de 0 à 40 bar

2 tournevis plat

2 clé à molettes

jeu de clé à fourche

Clé à six pans

b) Matière d'œuvre :

- *Combustible fioul*
-
-
-

I .4. Description du TP :

le stagiaire doit : - Faire le réglage du volet air selon la notice technique

- Faire le réglage de la pompe à fioul selon les directive du formateur

I .5. Déroulement du TP

Ces travaux pratiques doivent être faites par deux ou trois stagiaires

……………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………

TRAVAUX PRATIQUES N°I   COMPORTEMENT ATTEN DU   DUREE : 8 H

D- PREREGLER LE BRULEUR

CONTROLES PRELIMINAIRES

1. *Se référer aux instructions données par le constructeur de la chaudière.*
2. *Vérifier le plein d'eau de l'installation au moyen de l'hydromètre ou du niveau.*
3. *S'assurer que la pompe de circulation d'eau fonctionne normalement.*
4. *Vérifier si toute l'installation d'alimentation et de réparation du Fuel est en ordre de marche.*
5. *Vérifier si les vannes montées sur les canalisations de Fuel sont ouvertes.*
6. *Vérifier que la tuyauterie d'aspiration sur la citerne corresponde au flexible d'aspiration de la pompe du brûleur.*
7. *Vérifier le réglage de divers thermostat de la chaudière. le thermostat limiteur doit être toujours régler de 5 à 10°C au-dessous du thermostat régulateur.*
8. *Si l'installation est munie de réchauffeur, vérifier de réglage de son thermostat.*
9. *Si la chaudière est d'un registre de tirage, s'assure que celui-ci est ouvert.*
10. *Vérifier la quantité de Fuel restant dans la citerne.*

<u>Remarque importante</u>

La pompe du brûleur et celle d'alimentation ne doivent jamais tourner à sec. Il est donc indispensable, soit d'introduire de Fuel dans conduit d'aspiration, soit de provoquer l'amorçage à l'aide d'un bac placé à coté de la pompe et contenant du Fuel.

Avant la mise en service, remplir la pompe de brûleur avec Fuel.

Il est recommandé, lorsque la température de l'ai ambiant est basse, de manœuvrer, à la main, plusieurs fois le ventilateur, afin de contrôler si la pompe de brûleur tourne librement. Ceci avant la mise en service et avec l'installation hors tension.

TRAVAUX PRATIQUES N°I ***DUREE : 8 H***

Mise en service et réglage – WL30 une allure

Avant mise en service, la canalisation d'aspiration doit être remplie de fioul, ceci pouvant être effectué avec une pompe manuelle. La pompe fioul peut se bloquer en cas de fonctionnement à vide.

Déroulement du cycle 1 allure

Dans cette exécution le connecteur X3;2 est monté sur la console. La phase de préventillation débute au démarrage du brûleur. La phase de pré-allumage survient 13 s après.

A la fin de la préventilation, la vanne magnétique est alimentée, le fioul est libéré et la flamme se forme. Lors de la 1ère mise en service si la pompe ne pulvérise pas de fioul pendant le temps de sécurité de 10 secondes, il s'en suit un dérangement. Le brûleur doit être réarmé pour une nouvelle tentative de démarrage.

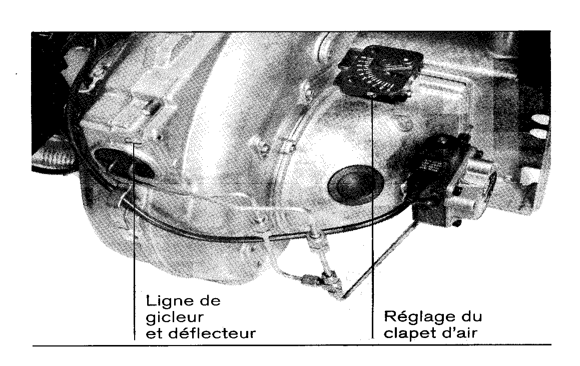
Si la flamme s'est formée pendant le temps de sécurité de 10 secondes, le transformateur reste sous tension pendant environ 15 secondes après l'ouverture de la vanne magnétique (post-allumage).

La flamme est contrôlée par un coffret de sécurité Landis et Gyr avec une cellule photo-résistante. Le coffret assure aussi le fonctionnement automatique du brûleur.

Lors de la 1ère mise en service, si le fioul n'est pas pulvérisé pendant le temps de sécurité, il est nécessaire de purger l'installation par la prise manométrique avant une nouvelle tentative de démarrage.

.

Le réglage du brûleur peut être effectué grâce aux diagrammes ci-dessous donnant la position du déflecteur et diagramme correspondant au type du brûleur).



Optimisation du réglage

Une fois le réglage de base effectué, il y a lieu d'optimiser les résultats par un affinement du réglage du brûleur. En réduisant la section entre la chambre de mélange et le déflecteur, on augmente la pression de l'air ce qui occasionne dans de nombreux cas une amélioration des valeurs de combustion.

La différence entre le réglage final et le réglage de base (d'après les diagrammes ci-dessous) est d'autant plus grande que la pression foyer diffère des valeurs les plus courantes.

Réarmement

En cas de dérangement du brûleur, le réarmement ne peut intervenir qu'après env.60 sec. Il faut actionner le bouton-poussoir rouge situé sur le capot du brûleur.

Réglage

Pour que le réglage d'un brûleur soit optimisé, il est nécessaire d'effectuer des mesures de combustion. Avant ces mesures, il faut vérifier que le générateur soit étanche afin d'éviter les entrées d'air parasite.

Optimisation des réglages selon les installations, il y a lieu d'optimiser les résultats par un affinement du réglage du brûleur En diminuant la section de passage entre le déflecteur et la tête de combustion, par rotation à gauche de la vis de réglage (image 2), on obtient une plus grande pression. Les valeurs du diagramme « pression devant la chambre de mélange » (page 8) en fonction du débit fuel, sont des valeurs indicatives. L'optimisation du petit débit en fonction de l'excès d'air s'effectue avec le contact de fin de course lll (image ***1).***

Travaux Pratiques N°I **Duree : 8 H**

Brûleur 2 allures

Les débit de 1ère et 2ème allure sont déterminés par la taille des gicleurs. Le rapport entre petit et grand débit doit être au maxi de 1;2,5 (par ex, Petit débit 10 kg/h et grand débit 25 kg/h). Le servo-moteur SQN g1 (temps d'ouverture 4 secondes pour 90°) assure simultanément le positionnement correct du clapet d'air et de la ligne de gicleur avec son déflecteur pour adapter la section de passage d'air de manière optimale. A l'arrêt du brûleur, le servo-moteur se referme entraînant le clapet d'air et le déflecteur en position 0.

Déroulement du cycle 2 allures

Pendant la préventilation de 13 secondes, le servo-moteur amène le clapet d'air et le déflecteur en position 1ère allure et autorise le démarrage du moteur par le contact de fin de course lll (dans le servo-moteur). Après la préventilation, la vanne magnétique 1 fermée hors tension est alimentée, le fioul est pulvérisé et la flamme se forme.

A la fin du post-allumage de 20 secondes, le servo-moteur reçoit à travers le régulateur de 2ème allure (sur le générateur) l'information de placer le clapet d'air et le déflecteur en position 2ème allure (fin de course l). Pendant l'ouverture, le contact de fin de course alimente la vanne magnétique (ouverture hors tension).

Si le générateur demande moins de chaleur, le servo-moteur retourne en position 1ère allure (fin de course lV) et l'alimentation de la vanne magnétique de 2ème allure est coupée par le fin de course V.A l'arrêt du brûleur, le servo-moteur par l'intermédiaire de la tension à la borne 1, retourne en position de fermeture jusqu'au fin de course ll.

Réglage 2 allures
Choix des gicleurs et réglage
Exemple: débit brûleur 19,8 kg/h.

Choisir le gicleur d'après le tableau page 6 à 12 bar :
1ère allure = 2,25 gph = 9,4 kg/h
2ème allure = 2,50 gph = 10,4 kg/h
selon le diagramme de réglage page 10 :
Position du clapet - Grand débit = 5,8
Position du clapet - Petit débit = 3,2
Position du déflecteur - Grand débit = 6,5
Servo-moteur - Grand débit = 58°
Servo-moteu - Petit débit = 32°

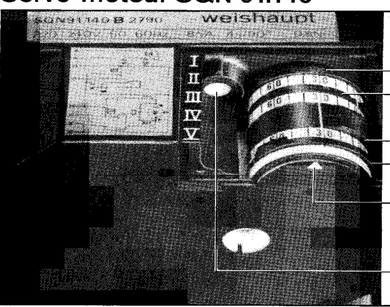
Monter le gicleur et avant le démarrage, régler la ligne (le déflecteur) et le clapet d'air comme suit :

1. *Déposer le couvercle du servo-moteur et débrayer l'entraînement (image 1)*
2. *Amener le levier de réglage à la main sur la position de clapet 5,8 (image 2)*
3. *Régler le fin de course 1 avec la clé de réglage (image 2) sur 58°(repère du disque blanc sur l'indicateur de position) (image 1)*
4. *La position du déflecteur avec 6,5 est réglée à l'aide de la vis (image 4) par rotation à droite (augmentation)*
5. *Ramener le levier de réglage (image 2) à la main jusqu'à la 1ère allure à 32°*
6. *Régler le contact de fin de course lV petit débit (image 1) à 32°. La position du déflecteur pour la 1ère allure sera trouvée automatiquement. Elle ne nécessite aucun réglage.*
7. *Régler le contact de fin de course V (image 1) de la vanne magnétique de 2e allure à envIron 2/3 de la distance entre petit et grand débit. Dans ce cas 49°*
8. *embrayer l'entraînement (image 1) – fente horizontale remonter le capot du servo-moteur et mettre le brûleur en route.*

TRAVAUX PRATIQUES N° I **DUREE : 8 H**

Servo-moteur SQN 91.140

Servo-moteur SQN 91.140

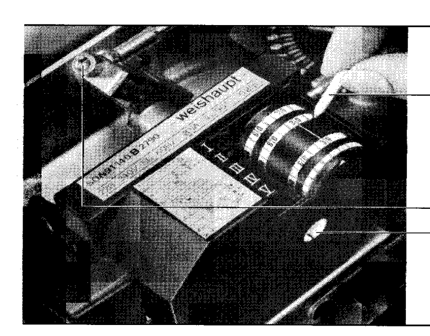


Cames :

- I Fin de course – Grand débit
- II Fin de course – Fermé
- III Fin de course – démarrage brûleur et petit débit
- IV Fin de course – (réglé env. 2° au desus de III)
- V Fin de course – Allure 2

Indicateur de position dec cames

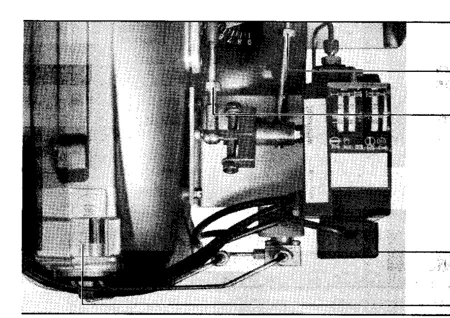
Débrayage de l'entraînement par pression et rotation de 90° (fente verticale)



Clé de réglage des cames (fixée dans le couvercle du servo-moteur)

Levier de réglage avec vis de réglage pour l'entraînement du clapet d'air et le réglage du déflecteur pour l'allure 2

Vis de fixation du levier de réglage

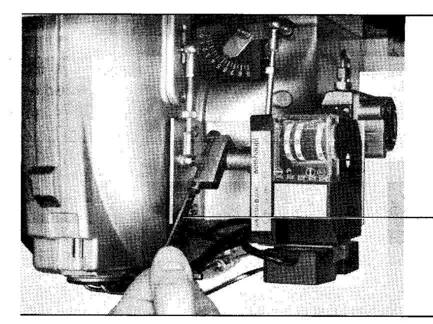


Liaison entre le clapet d'air et le levier de réglage (ne pas modifier le réglage d'usine)

Liaison entre le levier de réglage et la ligne gicleur (ne pas modifier le réglage d'usine)

Prise X7-4 pôles pour le régulateur 2ème allure du générateur et le voyant marche allure 2

Echelle de réglage du déflecteur (ligne de gicleur avec déflecteur)



Réglage du positionnement de la ligne de gicleur avec clé pour 6 pans creux

TRAVAUX PRATIQUES N° I **DUREE : 8 H**

Pompes fioul

Construction

Les pompes AL 35 C 9545, AL 65 C 9525, UNI 1,2 L5 et UNI 1,2 L62 peuvent fonctionner en mono ou bi-tubes.

Les brûleur WL30 et WL 30Z sont livrés de série pour fonctionnement en bi-tubes. Les pompes sont équipées d'un by-pass. Pour fonctionnement mono-tube, le by-pass doit être déposé et le retour bouchonné.

Emplacement de la vis de by-pass en fonction du type de la pompe :

AL 35 C *- accessible par le refoulement pompe (clé allen de 4) (2)*

AL 65 C *- accessible par le refoulement pompe(clé allen de 4) (2)*

UNI 1,2 L5 *- accessible par le refoulement pompe(clé allen de 4) (2)*

UNI 1,2 L62 *- accessible par le refoulement pompe(clé allen de 4) (2)*

Toutes les pompes sont équipées d'un régulateur de pression et d'une vanne magnétique normale.

Fonctionnement

Le fioul est pompé de la citerne, passe par un filtre incorporé et est conduit sous pression au gicleur à travers la vanne magnétique incorporée. La quantité de fioul excédentaire est conduite au retour à travers le régulateur de pression.

Une partie du fioul sous pression s'écoulera directement vers le retour au travers d'un passage de purge qui assurera automatiquement la purge des installation bi-tubes.

Par une installation mono-tube, la purge ne peut se faire que par la ligne gicleur vanne magnétique (7) ouverte ou par le raccord de mesure de pression de la pompe(4).

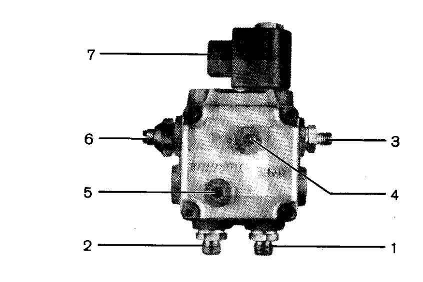
En alimentant la vanne magnétique (7) le passage est ouvert sur la ligne gicleur. La pression pompe est réglable sur les pompes par la vis (6).

A l'arrêt du brûleur, la vanne magnétique (7) ferme le passage du fioul vers le gicleur annulant instantanément le débit.

Pompe Suntec type AL35 C 9545

Pompe Suntec type AL65 C 9525

Pompe Eckerlé type UNI 1.2 L5



TRAVAUX PRATIQUES N° I **DUREE : 8 H**

Pompes fioul

La capacité d'aspiration des pompes :

AL35 C 9545 = 45 kg/h AL65 C 9525 = 85 kg/h

UNI 1,2 L5 = 45 kg/h UNI 1,2 L62 = 85 kg/h

Par les installations bi-tubes ou mono-tube, on pourra se servir des tableaux page 4 pour le dimensionnement des conduites.

Réglage de pompes

1. *Déposer le bouchon (4) de la prise manomètre. Mettre le brûleur en service et attendre l'apparition de fuel exempt d'air.*
2. *Pour contrôler la dépression, raccorder le vacuomètre sur la prise 5.*
3. *Pour contrôler la pression, raccorder le manomètre sur la prise 4.*
4. *Régler la pression pompe à l'aide de la vis 6.*

   Rotation à droite = augmentation de pression

   Rotation à gauche = diminution de pression

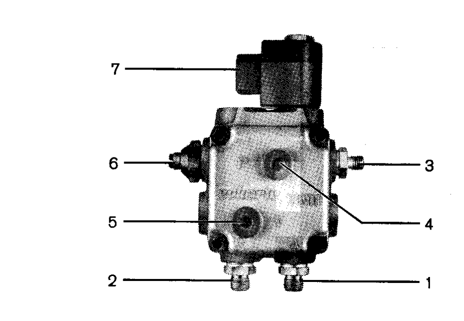
Plage de pression ————8 à 15 bar

(Réglage d'usine ———— 12 bar)

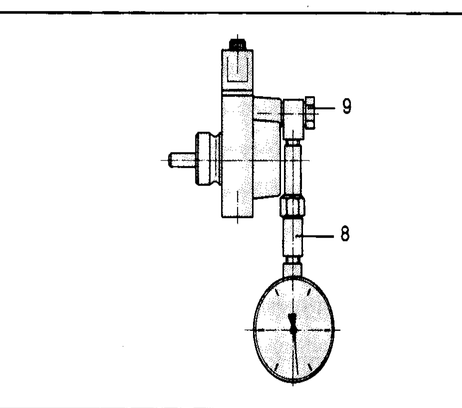
Remarque :
En cas de piquage sur une boucle, vérifier que la pression à l'aspiration ne dépasse pas 2 bar.

La dépression lue au vacuomètre ne doit pas dépasser- 0,4 bar.

Pompe Eckerlé type UNI 1.2 L62



Raccordement manomètre



1 Aspiration
2 Refoulement
3 Départ haute pression
4 Raccord manomètre
5 Raccord vacuomètre
6 Réglage de pression
7 Vanne magnétique normale
8 Raccord manomètre respectivement vacuomètre
9 Raccord manomètre

II. *TP II : intitulé du TP régler la combustion*

II.1. Objectif(s) visé(s) :

- *Réglage correcte de la flamme du brûleur*
- *Calculer le rendement de combustion.*

II .2. Durée du TP:

8 H

II 3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- *Brûleur*
- *chaudière*
- *Valise d'analyse de combustion*

2 clé à molettes
jeu 2 clé à fourche
Clé à six pans

b) Matière d'œuvre :

- *Combustible fioul*
-
-
-

Ii .4. Description du TP :

le stagiaire doit : - mettre en route le brûleur
- réglage de la flamme du brûleur
- mesurer l'opacité
- mesurer le CO_2
- mesure la température des fumées
- calculer le rendement de combustion

II I.5. Déroulement du TP

Ces travaux pratiques doivent être faites par deux ou trois stagiaires

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

TRAVAUX PRATIQUES N°II   COMPORTEMENT ATTENDU   DUREE : 8 H

E- REGLER LA COMBUSTION

MISE EN SERVICE ET CONTROLE DE COMBUSTION

La mise en marche du brûleur s'effectue en enclenchant l'interrupteur de commande placé sur le tableau électrique de la chaufferie.
Le brûleur va servir à « faire du feu » dans une chaudière. Comme chez les humains, le couple ainsi formés, est plus ou moins harmonieux. Le travail du technicien, consistera la maximum de ces matériels, dont le choix ne lui incombe pas dans la plupart des cas.

Procédure de mise en route

- *S'assurer de raccordement correct de la chaudière au conduit de fumée ainsi que de l'étanchéité de ce circuit. (portes, carneaux, boîte de fumé, trappe de ramonage).*
- *Vérifier l'ouverture des vannes d'isolement et le niveau de remplissage de l'installation.*
- *Mettre le brûleur sous tension. Deux ou trois tentatives seront nécessaire avant de voir apparaître la flamme.*
- *Dés que la brûleur fonctionne, vérifier la pression de pulvérisation par lecture au manomètres préalablement monté sur la pompe. Réajuster si nécessaire, car en générale celle-ci sortes d'usine réglées à 10 bars.*
- *Faire premier réglage en jouant sur l'entrée d'air. Le contrôle se fait visuellement en sachant que :*
    - ❖ *Si la flamme est rougeâtre, très mole, et quelle va dans toutes le sens, il monque de l'air ou le passage est trop important entre le tube extérieur et le stabilisateur de flamme :*
    - ❖ *Au contraire si la flamme est très dure et très claire, c'est qu'il y a trop d'air, refermer le volet d'air ou débrider le tête de combustion.*
    - ❖ *Ce premier réglage réaliser, ne pas oublier de mettre la pompe de circulation en fonctionnement, si non la chaudière va monter rapidement en température.*

TRAVAUX PRATIQUES N°II ***DUREE : 1/2 H***

Objectif poursuivi : *Savoir mesurer le CO_2*

Description sommaire de l'activité : *Le stagiaire doit faire une analyse de CO_2 des fumées cela la prescription donnée*

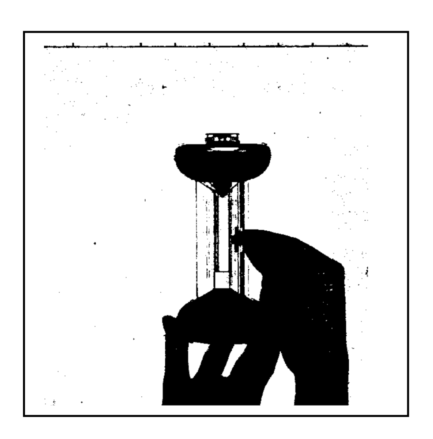
Lieu de l'activité : *Atelier*

Liste du matériel : *Analyseur chimique de CO_2*

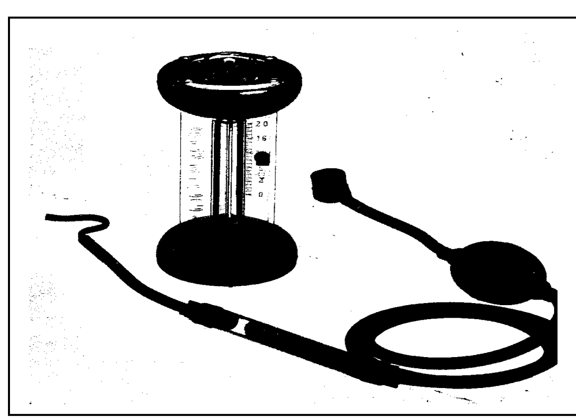
Directives particulières :

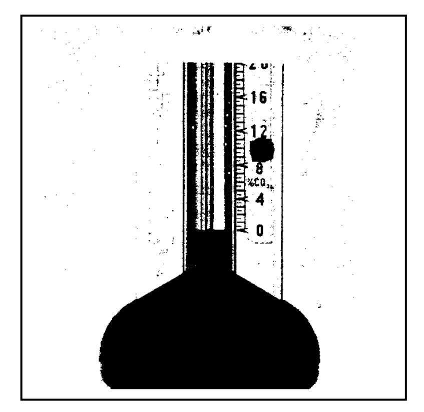
manipulation du matériel de prélèvement de CO_2 dans les fumées

Mode d'emploi



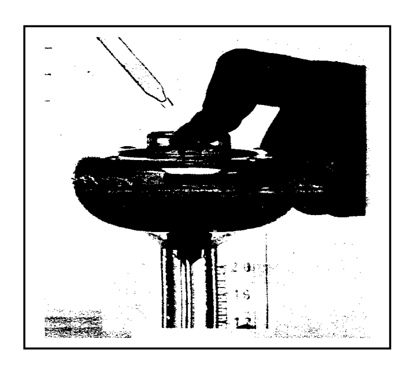
Ajuster le repère "zéro" de la réglette graduée.



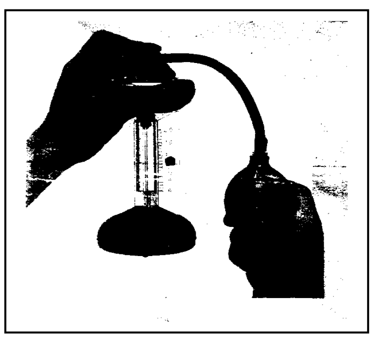


Matériel de prélèvement de CO2 de type"Fyrité"

…en face du niveau de liquide

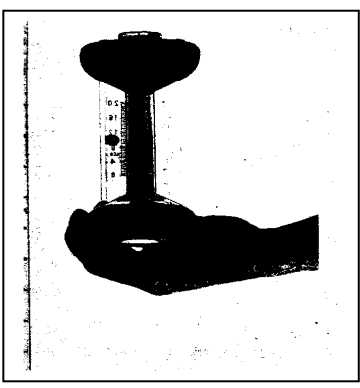


Compenser éventuellement le niveau, s'il est trop bas, avec Quelques goutte de potasse

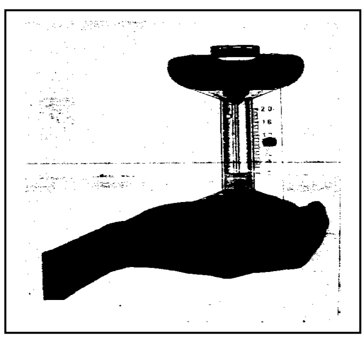


Prendre l'équipement de prélèvement et le mettre en place(avant coupe tirage s'il y en a un) dans le conduit de fumées

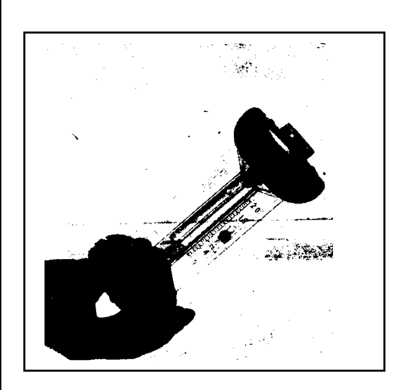
pomper 18 à 20 coups.



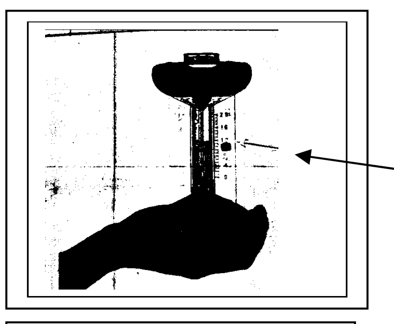
Renverser l'appareil afin de mouiller les parois intérieures



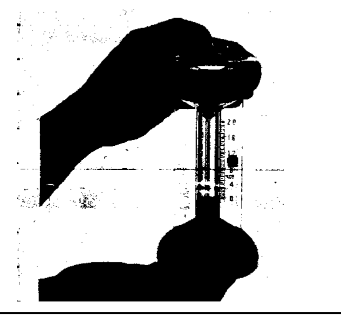
Reposer l'appareil et laisser descendre tout le réactif dans la Partie intérieure



L'inclurer à 45°, afin de récupérer le liquide restant au niveau du clapet



Mettre l'appareil bien droit et lire sur la réglette la graduation Qui correspond au niveau du liquide sur cet exemple elle est de 12% de CO_2 noter la sur une feuille



Appuyer sur le clapet plusieurs fois, pour permettre à la membrane de trouver sa position initiale

Evaluation de fin de module

Travail demandé :

- *Faire le démarrage du brûleur*
- *Régler la flamme à l’œil*
- *Regarder les fumées*
- *Régler le brûleur*
- *Faire l’analyse de combustion*
- *Calculer le rendement de combustion*
- *Calculer l’ excès d’air*
- *Calculer le volume de fumées dans les conditions normales*
- *Calculer le volume de fumées dans les conditions réelles*

Liste des références bibliographiques.

Ouvrage	***Auteur***	***Edition***
Combustion	*AFPA*	
Documentation GUENOD		